

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS
EN LA ENVOLVENTE PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO
AL INTERIOR DE LA VIVIENDA SOCIAL EN LA ZONA
NORTE DEL VALLE DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Abril Rueda Mateos

Tesis para optar por el grado de Maestra en Diseño
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado:

Director de la tesis
Dr. Aníbal Figueroa Castejón.

Co tutora de la tesis
Dra. Julia Mundo Hernández

Asesor
Héctor Valerdi Madrigal

México D.F.
Julio de 2014

Agradecimientos:

A la Universidad Autónoma Metropolitana *UAM* por brindarme la oportunidad de realizar el programa Arquitectura Bioclimática de la Maestría en Diseño.

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado *SEP PROMEP* por brindarme el apoyo para realizar la presente tesis de investigación vinculada al Proyecto: *Pautas Para el Confort Ambiental y el Desempeño Energético de la Vivienda Urbana*. con Número de Registro 25111115 de Apoyo a la integración de Redes Temáticas de Colaboración Académica, convocatoria 2013.

Al Dr. Aníbal Figueroa Castrejón y a la Dra. Julia Mundo Hernández por su dirección durante el proceso de investigación así como al cuerpo académico de Arquitectura Bioclimática, miembros del jurado, compañeros, familia, novio y amigos por el apoyo brindado.

Gracias.

Compartimos mecanismos [fisiológicos] de regulación de la temperatura con otros mamíferos. [. . .] Pero también usamos ropa y refugio y quemamos combustible para calentarnos y enfriarnos. Esto ha hecho posible la supervivencia para nuestra especie en casi todos los climas, pero también ha creado nuevos tipos de vulnerabilidad. La temperatura de nuestro cuerpo ahora depende del precio de la ropa o del combustible [. . .], ya sea que trabajemos en interiores o al aire libre, dependemos de nuestra libertad para evitar o salir de lugares con regímenes de temperatura estresantes. [. . .] Por lo tanto, nuestro régimen de temperatura no es una simple consecuencia de las necesidades térmicas, sino más bien un producto de condiciones sociales y económicas. (Levins & Lewontin, 1985).

Resumen

El diseño de soluciones constructivas para mejorar el confort térmico al interior de la vivienda social en la Zona Norte del Valle de la Ciudad de México surge como una iniciativa ante las condiciones térmicas desfavorables al interior de la vivienda social existentes hoy en día (SHF, 2005-2012). El estudio incluye una evaluación de las condiciones térmicas originales para diagnosticar el grado de confort así como el desempeño térmico de la envolvente. Dicha evaluación se logró a partir de una muestra de estudio generada con modelos de simulación numérica con variables estadísticas que incluyen los tipos de sistemas constructivos en techos y muros, tipo de usuario y orientación. El diagnóstico muestra que el 71% de los casos de estudio presentaron Temperaturas Operativas T_o de bajo calentamiento al interior¹; el 18% presentó T_o de sobrecalentamiento al interior y sólo un 11% presentó T_o dentro del rango de confort. Por otro lado, los suelos sobre terreno, cubiertas y muros fueron los elementos de la envolvente con mayores pérdidas de calor con un 25%, 10% y 9% del total de las pérdidas respectivamente (la cantidad de calor perdida es directamente proporcional al número de integrantes en la vivienda, y por lo tanto a las ganancias de calor al interior). A partir de esta primera evaluación se propusieron adecuaciones a la envolvente que no afectaran elementos estructurales conforme a las condiciones de cada caso las cuales son: aislamiento térmico de suelos, muros y techos, integración de muro trombe y dispositivos de control solar. La evaluación de los casos de estudio con la integración de las soluciones constructivas muestra que el 90%² de los casos de estudio se encuentran dentro del rango de confort mientras que en un 10%, la incorporación de medidas pasivas en la envolvente no es suficiente para lograr una T_o anual dentro del rango de confort. Dentro de las conclusiones se incluyen las adecuaciones más pertinentes por tipo de vivienda así como recomendaciones para nuevas construcciones en base a los resultados obtenidos.

¹ Basado en el cálculo del rango de confort para edificios ventilados naturalmente (ASHRAE, 2010)

² El 90% incluye el 11% de casos que inicialmente presentaron T_o de confort.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 <i>Antecedentes.....</i>	<i>3</i>
1.1.1 <i>La Zona Metropolitana de la Ciudad de México a través del Tiempo</i>	<i>3</i>
1.1.2 <i>El desarrollo de la Vivienda Social en la ZMCM.....</i>	<i>4</i>
1.1.3 <i>Situación Actual de la Vivienda Social en México</i>	<i>5</i>
1.1.4 <i>Vivienda Social y Confort térmico.....</i>	<i>6</i>
1.1.5 <i>Adaptación de la Vivienda en México</i>	<i>7</i>
1.2 <i>Planteamiento y delimitación del problema.....</i>	<i>8</i>
1.3 <i>Objetivo general.....</i>	<i>9</i>
1.4 <i>Hipótesis general.....</i>	<i>9</i>
1.5 <i>Motivación para elaborar la investigación.....</i>	<i>9</i>
1.6 <i>Procedimiento</i>	<i>9</i>
1.7 <i>Desarrollo del documento.....</i>	<i>10</i>
1.8 <i>Resultados y Aportaciones</i>	<i>11</i>
2. Marco Teórico.....	13
2.1 <i>Confort Térmico</i>	<i>13</i>
2.2 <i>Balance Térmico del Edificio.....</i>	<i>15</i>
2.1.1 <i>Leyes de Termodinámica</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>Leyes de Conservación</i>	<i>17</i>
2.1.3 <i>Transferencia de Calor.....</i>	<i>17</i>
2.3 <i>Envolvente del edificio y su importancia en el Confort Térmico</i>	<i>19</i>
2.4 <i>Rehabilitación de Vivienda y Confort Térmico.....</i>	<i>20</i>
2.5 <i>Modelos de Simulación Numérica para la Evaluación Térmica de Edificios.....</i>	<i>22</i>
3. Marco conceptual	24
4. Marco Metodológico.....	26
4.1 <i>Objetivos.....</i>	<i>26</i>
4.1.1 <i>Objetivo general</i>	<i>26</i>
4.1.2 <i>Objetivos particulares</i>	<i>26</i>
4.2 <i>Hipótesis o supuestos</i>	<i>27</i>

4.3	<i>Preguntas de investigación</i>	27
4.4	<i>Metodología</i>	28
4.4.1.	<i>Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo</i>	28
4.4.2.	<i>Evaluación del confort térmico interior</i>	30
4.5	<i>Técnicas y herramientas para realizar la investigación</i>	31
4.5.1	<i>Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo</i>	31
4.4.1	<i>Evaluación del confort térmico interior</i>	33
5.	Caso de Estudio:	35
5.1	<i>Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México</i>	35
5.2	<i>Cálculo de Confort Térmico para el NZMCM</i>	35
5.3	<i>El Clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México</i>	36
5.3.1	<i>Temperatura.</i>	37
5.3.2	<i>Índice ombrotérmico:</i>	38
5.3.3	<i>Radiación Solar.</i>	39
5.3.4	<i>Asoleamiento.</i>	40
5.4	<i>Requerimientos bioclimáticos</i>	41
5.4.1	<i>Diagrama Bioclimático.</i>	41
5.4.1	<i>Triángulos de Confort.</i>	42
5.4.1	<i>Diagrama Psicométrico.</i>	43
5.4.2	<i>Días Grado</i>	45
5.4.3	<i>Resumen de Estrategias de Control de acuerdo a los Requerimientos Bioclimáticos.</i>	46
5.5	<i>Monitoreo de vivienda en sitio.</i>	46
5.6	<i>Características arquitectónicas de la vivienda y generación modelo de simulación:</i>	47
5.7	<i>Calibración y validación del modelo de simulación:</i>	48
5.7.1	<i>Datos de calibración.</i>	50
5.7.2	<i>Documentación</i>	50
5.7.3	<i>Cerramientos/Envolvente</i>	51
5.7.4	<i>Cargas internas</i>	52
5.7.5	<i>Identificación de errores.</i>	52
5.7.6	<i>Repetición del proceso.</i>	53
5.8	<i>Recopilación estadística del NZMVM.</i>	57
5.8.1	<i>Usuario:</i>	57

5.8.2	<i>Material de Muro:</i>	57
5.8.3	<i>Material de Losa:</i>	58
5.8.4	<i>Orientación:</i>	59
5.9	<i>Generación de Universo de Estudio para el NZMCM.</i>	60
5.10	<i>Conclusión Capitular</i>	61
6.	Evaluación del Universo de Estudio.	63
6.1	<i>Evaluación del Confort Térmico.</i>	63
6.1.1	<i>Evaluación por Sistema Constructivo.</i>	66
6.1.2	<i>Evaluación por Orientación</i>	68
6.1.3	<i>Evaluación de Recámara 1 durante Temporada de Verano.</i>	72
6.1.4	<i>Evaluación de Recámara 1 durante Temporada de Invierno.</i>	74
6.1.5	<i>Resultados Generales</i>	76
6.2	<i>Cálculo de Balance Térmico.</i>	77
6.2.1	<i>Evaluación por Temperatura Operativa.</i>	80
6.3	<i>Conclusión Capitular.</i>	82
7.	Diseño de Soluciones Constructivas.	86
7.1	<i>Aislamiento en Envolvente.</i>	87
7.1.1	<i>Disposición del Aislamiento Térmico.</i>	87
7.1.2	<i>Comparación de Aislantes considerando Tres Variables de Evaluación:</i>	90
7.1.3	<i>Selección de Aislantes para Envolvente:</i>	93
7.2	<i>Muro Trombe.</i>	97
7.3	<i>Protección Solar.</i>	99
7.4	<i>Conclusión Capitular</i>	103
8.	Evaluación de Soluciones Constructivas.	104
8.1	<i>Aislamiento en Envolvente.</i>	104
8.1.1	<i>Resultados para Usuario U1</i>	106
8.1.2	<i>Resultados para Usuario U2</i>	108
8.1.3	<i>Resultados para Usuario U3</i>	110
8.2	<i>Muro Trombe.</i>	113
8.2.1	<i>Resultados Mensuales.</i>	115
8.2.2	<i>Resultados Horarios.</i>	117
8.3	<i>Protección Solar.</i>	121

8.3.1	<i>Resultados Anuales</i>	121
8.3.2	<i>Resultados Horarios</i>	123
8.4	<i>Conclusión Capitular</i>	126
9.	Resultados Finales	128
9.1	<i>Soluciones Constructivas en la Envolvente</i>	130
9.2	<i>Recomendaciones para nuevas construcciones</i>	134
10.	Conclusión	136
	Anexos	144

Índice de Figuras

Figura 1.	Asentamientos irregulares en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.	2
Figura 2.	Crecimiento de la Mancha Urbana Zona Metropolitana del Valle de México.	3
Figura 3.	Modelo horizontal de vivienda social aplicado en el NZMVM y en periferias de ciudades en la República Mexicana. Fuente: www.metroscubicos.com	4
Figura 4.	Temperaturas operativas aceptables al interior de los espacios. Fuente: ASHRAE, 2010.	15
Figura 5.	Marco conceptual de la Tesis de Investigación. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 6:	Fases clave en la rehabilitación sustentable de un edificio. Fuente: Elaboración propia en base a Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art, Ma, et al., 2012	28
Figura 7.	Primera etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo, Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 8.	Segunda etapa: Evaluación del confort térmico interior. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 9	Técnicas y herramientas para la primera etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 10.	Técnicas y herramientas para la segunda etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura. 11.	Rangos mínimos y máximos de confort para el Norte de la ZMVM. Fuente: Elaboración propia en base a CBE Thermal Comfort Tool, 2013, Center for the Built Environment, University of California Berkeley.	36
Figura 12.	Análisis de temperatura anual, oscilación térmica y rango de confort térmico. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)	37

Figura 13. Temperaturas horarias en la ZMVC. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)	38
Figura 14. Análisis de índice ombrotérmico anual. Elaboración propia en base a la.....	39
Figura 15. Análisis de radiación solar anual. Fuente: Elaboración propia en base a la	39
Figura 16. Radiación total diaria. Fuente: Elaboración propia en base a la	40
Figura 17. Carta estereográfica del primer y segundo semestre latitud (19°35' N). Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Cálculos Para el Trazo de la Gráfica Solar (Fuentes, 2011)	41
Figura 18. Análisis de días grado anual. Fuente: Elaboración propia en base	45
Figura 19. Diagrama Bioclimático para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base	42
Figura 20. Triángulos de Confort de Evans para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base	43
Figura 21. Estrategias bioclimáticas para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base	43
Figura 22. Diagrama Psicométrico para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base	44
Figura 23. Vivienda Monitoreada, Modelo de Simulación Casa en el Norte de la ZMVM. Fuente: Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climas de México (Figuerola, et al., 2009)	47
Figura 24. Sección Longitudinal de Vivienda Monitoreada. Fuente: Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climas de México (Figuerola, et al., 2009)	48
Figura 25. Modelo simulación de Software <i>DesignBuilder</i> de la vivienda monitoreada. Fuente: Modelo de Simulación Casa en el NZMVM, (Figuerola, et al., 2009).....	48
Figura. 26. Modelo de simulación después de realizar las modificaciones del sitio. Fuente: Elaboración propia en base al Software <i>DesignBuilder</i>	53
Figura. 27. Variables de cada solución a partir de los casos de estudio disponibles.....	91
Figura. 28. Identificación de casos ideales en cada variable de acuerdo al campo. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura. 29. Comparación de casos de estudio con casos ideales. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura. 30. Integración de los valores de cada solución a partir de principios trigonométricos. Fuente: Elaboración propia.	93

Figura 31. Esquema de sistema de doble cristal en invierno y verano. Fuente: SGG Planitherm 4S.	98
Figura 32. Recomendación de dispositivos de control solar por orientación. Fuente:	100
Figura 33. Dispositivo de Control Solar para orientación sur. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 34. Dispositivo de control solar para la orientación suroeste. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 35. Dispositivo de control solar para la orientación suroeste. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 36. Dispositivo de control solar para la orientación este. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 37. Dispositivo de control solar para la orientación este. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 38. Aplicación de aislantes en suelos, muros y techos. Fuente: Uso de Aislamiento en Vivienda (AEAEE), 2011).....	105
Figura 39. Implementación de aislantes en elementos constructivos. Fuente: Elaboración propia.	106
Figura 40. Selección de recámaras para la integración del muro trombe. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 41. Ubicación del muro trombe en Recámara 1 para las orientaciones	114

Índice de Tablas

Tabla 1.....	7
Tabla 2.....	14
Tabla 3.....	21
Tabla 4.....	46
Tabla 5.....	49
Tabla 6.....	51
Tabla 7.....	54
Tabla 8.....	54
Tabla 9.....	57
Tabla 10.....	58
Tabla 11.....	59
Tabla 12.....	60
Tabla 13.....	76
Tabla 14.....	83
Tabla 15.....	86
Tabla 16.....	94
Tabla 17.....	94
Tabla 18.....	95

Tabla 19.....	97
Tabla 20.....	105
Tabla 21.....	127
Tabla 22.....	130
Tabla 23.....	131
Tabla 24.....	132
Tabla 25.....	133
Tabla 26.....	134

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Acciones para solucionar la demanda de Vivienda en México.	6
Gráfica 2. Índice de Satisfacción Residencial en la República Mexicana y en la ZMVM en los últimos años. Fuente: Elaboración propia en base a SHF, Satisfacción Residencial 2005-2012, México.....	7
Gráfica 3. Rango de Confort Térmico Mensual para un 80% y 90% de Aceptación. Fuente: Elaboración propia en base a (ASHRAE, 2010)	36
Gráfica 4. Porcentaje de horas dentro del rango de confort térmico mensual y anual.	44
Gráfica 5. Temperatura monitoreada y simulada al interior de la vivienda. Fuente: Resultados Cualitativos y Cuantitativos Casa en el NZMVM (Figuerola, et al., 2009).....	49
Gráfica 6. CVRMSE Calculado para bulbo seco y humedad en revisiones. Fuente: Elaboración propia ...	56
Gráfica 7. MBE Calculado para bulbo seco y humedad en revisiones. Fuente: Elaboración propia	56
Gráfica 8. Número de integrantes por vivienda en la ZMVM.	57
Gráfica 9. Comparación de To en diferentes orientaciones. Fuente. Elaboración propia.	60
Gráfica 10. Temperaturas Operativas para los casos con Usuario U1. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Gráfica 11. Temperaturas Operativas para los casos con Usuario U2. Fuente: Elaboración Propia.....	65
Gráfica 12. Temperaturas Operativas para los casos con Usuario U3. Fuente: Elaboración Propia.....	66
Gráfica 13. Usuario U1: To interior de la vivienda para los sistemas constructivos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	67
Gráfica 14. Usuario U2: To interior de la vivienda para los sistemas constructivos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	67
Gráfica 15 Usuario U3: To interior de la vivienda para los sistemas constructivos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	68

Gráfica 16. Usuario U1: To interior de la vivienda para las orientaciones de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	69
Gráfica 17. Usuario U2: To interior de la vivienda para las orientaciones de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	69
Gráfica 18. Usuario U3: To interior de la vivienda para las orientaciones de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	70
Gráfica 19. Promedio de oscilación térmica para las orientaciones de estudio por tipo de usuario. Fuente: Elaboración propia	70
Gráfica 20. Temperatura Operativa en la Recámara 1 con el usuario <i>U1</i> durante el mes de abril.....	72
Gráfica 21. To por sistema constructivo durante abril en la recamara 1. Fuente. Elaboración propia.....	73
Gráfica 22. To y Ganancias Internas por elementos ventanas.....	74
Gráfica 23. Temperatura Operativa en la Recámara 1 con el usuario <i>U3</i> durante el mes de enero.	74
Gráfica 24. To por sistema constructivo durante invierno en la recamara 1. Fuente: Elaboración propia...75	
Gráfica 25. To por orientación durante invierno en la recamara 1. Fuente: Elaboración propia.	75
Gráfica 26. Suma de °C por debajo del rango de confort en las viviendas de acuerdo al modelo adaptativo. Fuente: Elaboración propia.	77
Gráfica 27. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U1. Fuente: Elaboración propia.	78
Gráfica 28. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U2. Fuente: Elaboración propia.	79
Gráfica 29. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U3. Fuente: Elaboración propia.	79
Gráfica 30. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo sin aislante. Fuede: Elaboración propia en base a <i>Dynamic Thermal Property Calculator 1.0</i> (The Concrete Center, 2009)	88
Gráfica 31. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo sin aislante. Fuede: Elaboración propia en base a <i>Dynamic Thermal Property Calculator 1.0</i> (The Concrete Center, 2009)	89
Gráfica 32. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo con aislante al interior. Fuede: Elaboración propia en base a <i>Dynamic Thermal Property Calculator 1.0</i> (The Concrete Center, 2009).....	90
Gráfica 33. Área calculada por solución para muros, la mejor opción de aislante es un Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas o similar. Fuente: Elaboración propia.	96

Gráfica 34. Área calculada por solución para muros, la mejor opción evaluada es un Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales.. Fuente: Elaboración propia.	96
Gráfica 35. Área calculada por solución para techos, se acuerdo a la evaluación, la mejor opción es un Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar. Fuente: Elaboración propia. ...	96
Gráfica 36. Capacidad de Calor interno y valor U de acuerdo al espesor del muro de concreto. Fuente: Elaboración propia en base al Programa Design Builder.	99
Gráfica 37. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario. Fuente: Elaboración propia.	107
Gráfica 38. Incremento de temperatura (%) en casos de estudio con usuario U1 al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.	107
Gráfica 39. Semana de Diseño en Verano <i>U1M3L2O1</i> . Fuente: Elaboración propia.	107
Gráfica 40. Semana de Diseño en Invierno <i>U1M3L2O1</i> . Fuente: Elaboración propia.	108
Gráfica 41. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario U2. Fuente: Elaboración propia.	109
Gráfica 42. Incremento de temperatura en casos de estudio con usuario U2 al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.	109
Gráfica 43. Semana de Verano <i>U2M3L3O4</i> . Fuente: Elaboración propia.	110
Gráfica 44. Semana de Invierno <i>U2M3L3O4</i> . Fuente: Elaboración propia.	110
Gráfica 45. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario U3. Fuente: Elaboración propia.	111
Gráfica 46. Incremento de temperatura en casos de estudio con usuario U3 al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.	112
Gráfica 47. Semana de Diseño en Verano <i>U3M3L1O6</i> . Fuente: Elaboración propia.	112
Gráfica 48. Semana de Diseño en Invierno <i>U3M3L1O6</i> . Fuente: Elaboración propia.	112
Gráfica 49. Resultados generales después reducir el flujo de calor por conducción para disminuir las pérdidas de calor. Fuente: Elaboración propia.	113
Gráfica 50. Temperaturas operativas originales y con la integración del muro trombe en las fachadas de las Recámaras 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.	116
Gráfica 51. Incremento de temperatura por Sistema Constructivo para Recamara 1. Fuente: Elaboración propia.	116
Gráfica 52. Incremento de Temperatura y Ganancias Solares por Orientación. Fuente: Elaboración propia.	117
Gráfica 53. Orientación <i>O</i> para el caso <i>U3M2L2O1</i> . Fuente: Elaboración propia.	119

Gráfica 54. Orientación <i>SO</i> para el caso <i>U3M2L2O2</i> . Fuente: Elaboración propia.....	119
Gráfica 55. Orientación <i>SE</i> . Fuente: Elaboración propia.....	120
Gráfica 56. Orientación <i>S</i> para el caso <i>U3M2L2O3</i> . Fuente: Elaboración propia.....	120
Gráfica 57. Orientación <i>E</i> para el caso <i>U3MIL3O5</i> . Fuente: Elaboración propia	120
Gráfica 58. Decremento de <i>To</i> en la recámara 1 a partir de soluciones constructivas. Fuente: Elaboración propia.....	121
Gráfica 59. Decremento de <i>To</i> por Sistema Constructivo. Fuente: Elaboración propia	122
Gráfica 60. Decremento de <i>To</i> por Orientación. Fuente: Elaboración propia.....	122
Gráfica 61. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso <i>MIL2O1</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia	123
Gráfica 62. Temperaturas operativas para el caso <i>MIL2O1</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia	123
Gráfica 63. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso <i>M2L3O2</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.	124
Gráfica 64. Temperaturas operativas para el caso <i>M2L3O2</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia	124
Gráfica 65. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso <i>M3L2O3</i> durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.	125
Gráfica 66. Temperaturas operativas para el caso <i>M3L2O3</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia	125
Gráfica 67. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso <i>M3L2O5</i> durante los días de diseño de verano antes y después de interar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.	126
Gráfica 68. Temperaturas operativas para el caso <i>M3L2O5</i> durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.	126
Gráfica 69. <i>To</i> anuales al interior de las viviendas de estudio. Fuente: Elaboración Propia.....	128
Gráfica 70. Porcentajes de casos con bajo calentamiento, confort y sobrecalentamiento del universo de Estudio. Fuente: Elaboración propia.	128
Gráfica 71. <i>To</i> anuales al interior de las viviendas de estudio después de integrar la solución constructiva en envolvente. Fuente: Elaboración Propia.....	129
Gráfica 72. Porcentaje de soluciones constructivas de acuerdo al Universo de Estudio. Fuente: Elaboración Propia.	129

Índice de Anexos

Anexo 1. Programación horaria de uso en el programa de simulación.	144
Anexo 2. Evaluación del Confort.....	146
Anexo 3. Cálculo del Balance Térmico	151
Anexo 4. Comparación de Aislantes con Tres Variables de Evaluación	152
Anexo 5. Programación horaria de Muro Trombe	153
Anexo 6. Evaluación de Soluciones Constructivas	154

1. Introducción

La presente investigación dará continuidad al proyecto *PROMEP: Pautas para el Confort Ambiental y el Desempeño Energético de la Vivienda Urbana* de la *Red Arquitectura Bioclimática (RAB)*³ con la iniciativa de conocer las condiciones de confort térmico en el interior de la vivienda social en Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en caso de que éste resulte desfavorable, proponer soluciones constructivas que puedan mejorar los niveles de confort al interior de la vivienda.

El fenómeno de vivienda social en México ha sufrido modificaciones en busca de la mayor eficiencia posible al menor costo. Los intereses principalmente económicos han dado como resultado una vivienda de baja calidad en su diseño y construcción que repercute directamente en la calidad de vida del usuario. (Corral Sánchez, 2012).

En base a la afirmación de Levins y Lewontin mencionada al principio del documento se asume que las viviendas del sector de la población con las condiciones económicas más desfavorables, presentarán también las condiciones térmicas con los niveles más bajos en comparación de aquellas viviendas que se encuentran en los sectores económicos medios y altos.

La vivienda autoconstruida en asentamientos irregulares presenta deficiencias en la calidad de vida que incluso pueden resultar más graves que aquellas en la vivienda social, sin embargo, el trabajo se enfoca al segundo caso debido a que las condicionantes que caracterizan la población de la vivienda autoconstruida no son constantes ni han sido cuantificados estadísticamente (probablemente por su irregularidad) por lo que resulta imprudente realizar propuestas generales habiendo características con tal particularidad ya que los resultados serán de igual forma particulares. Figura 1.

El panorama de la vivienda social es diferente, ya que con un rango relativamente estrecho de variables⁴, se han construido millones de viviendas siendo posible realizar un estudio estadístico donde en base a una muestra de población se propongan soluciones a una población determinada. Es por ello que la investigación se enfoca en la evaluación térmica de la vivienda social para dar a conocer las condiciones

³usará y dará continuidad a los resultados del Proyecto en cuanto a interpretación de los resultados obtenidos del monitoreo in situ de una vivienda y con el uso de modelos de simulación generados en él.

⁴ Las condiciones arquitectónicas como medidas mínimas, lotificación y distribución de los espacios; condiciones de uso como número de integrantes por vivienda, horarios y tipo de uso y los sistemas constructivos o materiales de construcción son características que presentan rangos de variables cuantificadas estadísticamente. (INEGI, 2012), (SHF, 2005-2012), (Figueroa, et al., 2013).

térmicas del interior la vivienda en una zona de estudio específica y proponer soluciones constructivas a partir de las cuales se logre mejorar el confort térmico interior en las viviendas de la población de estudio.



Figura1. Asentamientos irregulares en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
Fuente: Reportajes Cuarenta, 2014.

El trabajo tiene como caso de estudio el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México debido a que dentro del proyecto *Pautas para el Confort Ambiental y el Desempeño Energético de la Vivienda Urbana*⁵ se han realizado estudios sobre la vivienda social en el tema que serán incorporados a la investigación y complementados con los resultados generados en la misma.

El trabajo se realizó partir de una muestra de estudio o *Universo de Estudio* de 162 viviendas generadas en el programa de simulación energética de edificios *DesignBuilder*® 3.0.0.104 con el motor de cálculo *EnergyPlus*® 7.0.0.036. Dicha muestra se formuló a partir de un caso base real con variables de tres tipos de usuarios, tres tipos de sistema constructivo en muros y tres en losas y cuatro tipos de orientación.

Los casos de estudio fueron simulados de acuerdo a las condiciones de estudio para obtener la Temperatura Operativa T_o anual al interior de la vivienda y el balance térmico de los elementos constructivos para evaluar el nivel de confort térmico en base a los estándares internacionales (ASHRAE, 2010) y las pérdidas o ganancias térmicas de la envolvente.

Para los casos con usuarios con mayor número de integrantes por vivienda se realizaron simulaciones en el mes más cálido y para los casos con usuarios con menor número de integrantes por vivienda se realizaron simulaciones en el mes más frío para conocer la T_o y por lo tanto los niveles de confort en las condiciones más extremas.

⁵ El objetivo general de Proyecto es “Mejorar las condiciones de confort ambiental, eficiencia energética y calidad de vida de los usuarios de vivienda masiva de los centros de población y zonas conurbadas de diferentes regiones de México. (Figueroa, et al., 2013)

Una vez realizada la primera evaluación o diagnóstico de las condiciones actuales, se propusieron soluciones constructivas en la envolvente para los casos que no presentaron una T_o dentro del rango de confort. Las propuestas se sustentan en el estudio de balance térmico y en un estudio de posibles adecuaciones de acuerdo a la disposición de soluciones constructivas en el mercado. Los modelos con la integración de las soluciones fueron simulados para conocer las nuevas condiciones de confort térmico. Para los casos con condiciones extremas, se priorizó el uso de una recámara como el espacio privado más habitable por lo que para estos casos las soluciones se enfocan en mejorar el confort térmico al interior de este espacio.

Se generaron un total de 815 simulaciones a partir de los 162 casos base, los resultados obtenidos son sintetizados y presentados por grupos de casos de estudio para jerarquizar las adecuaciones más pertinentes por caso mostrando el incremento de confort como un aumento o decremento de la T_o interior ($^{\circ}\text{C}$). La información obtenida también se presenta como un diagnóstico para evidenciar las características de la Vivienda Social en la zona de estudio que afecta en mayor medida al confort térmico por lo que el producto final es una relación de las soluciones más adecuadas de acuerdo a las variables integradas y recomendaciones para nuevas construcciones de vivienda en la zona.

1.1 Antecedentes

1.1.1 La Zona Metropolitana de la Ciudad de México a través del Tiempo

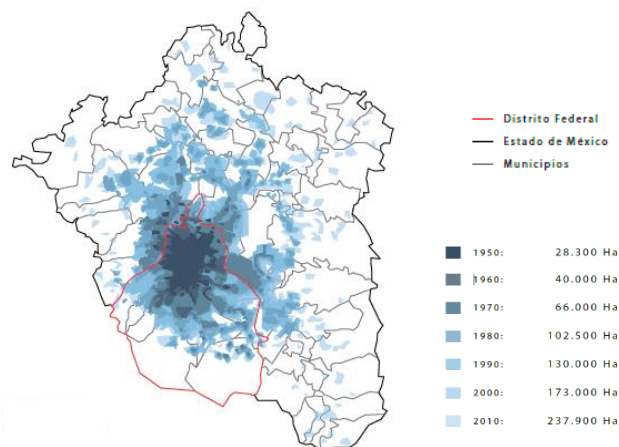


Figura2. Crecimiento de la Mancha Urbana Zona Metropolitana del Valle de México.
Fuente: Sistema Nacional de Creadores de Arte Emisión 2008

La ciudad de México, como otras capitales en el mundo, tuvo un crecimiento irregular regido principalmente por la economía. A mediados de siglo XX, ideologías de modernidad y desarrollo

desprestigiaban al campo; la búsqueda de prosperidad económica, impulsó el crecimiento urbano por lo que la población se concentró al centro y norte de la ciudad. El crecimiento durante la segunda mitad de siglo fue radial por lo que la mancha urbana se extendió hacia el Estado de México y hacia el sur de la ciudad. (Corral, 2012).

Como se puede observar en la Figura2, en la década de 1990 al 2000 hubo un crecimiento de 43,000 ha mientras que del año 2000 al año 2010, el crecimiento fue de 64,900 ha (cerca un 40% mayor). Además del crecimiento acelerado éste fue menos denso y continuó con la misma tendencia hasta el año 2010, año en el que el área urbanizada abarca prácticamente toda la superficie del Estado de México en asentamientos pequeños y dispersos lo que implica menor cantidad de servicios, menor equipamiento urbano, mayor inseguridad y por lo tanto, menor calidad de vida.

1.1.2 El desarrollo de la Vivienda Social en la ZMCM.

A mediados de siglo surge el modelo de vivienda vertical en la Ciudad de México con el que se lograron obras como el Multifamiliar Presidente M. Alemán de Mario Pani o la Unidad Habitacional Nonoalco Tlatelolco también de Mario Pani y Luis R. Cunningham. En los proyectos se buscaba densificar áreas destinadas a la vivienda y ofrecer servicios que permitieran generar núcleos autosuficientes para un radio específico de población.



Figura3. Modelo horizontal de vivienda social aplicado en el NZMVM y en periferias de ciudades en la República Mexicana. Fuente: www.metroscubicos.com.

En las décadas de 1980 y 1990 hubo cambios radicales en las reformas gubernamentales que afectaron entre otros sectores a la vivienda social; de 1988 a 1994 se reformaron leyes relacionadas con el suelo, dando la oportunidad a ejidatarios y comuneros de negociar sus terrenos en forma privada con agentes privados o públicos. Esto facilitó la incorporación de este tipo de suelo al desarrollo urbano que, al ser adquirido a muy

bajo precio por grandes agentes, se convirtieron en los desarrollos habitacionales alejados de la Zona Metropolitana. Figura 3.

La lejanía de los nuevos desarrollos implicó mayores costos de infraestructura, tierra, abastecimiento de servicios y otros factores que fueron absorbidos por los compradores al tener una menor calidad en los materiales, acabados y dimensiones de la vivienda. El bajo costo de la tierra también provocó que constructoras desarrollaran conjuntos habitacionales de vivienda horizontal de interés social sobre grandes extensiones cubriendo una demanda habitacional pero repitiendo modelos sin una norma rigurosa aplicada que concluyó en una oferta deficiente y limitada. (Corral, 2012).

En el sexenio del ex presidente Vicente Fox Quesada, el ritmo de construcción de viviendas pretendía la construcción de 2.300 viviendas por día, se logró un crecimiento de alrededor de 2.350.000 viviendas en la República Mexicana, fue el crecimiento anual de vivienda más alto en la historia de México, la mayoría de las viviendas se encuentran en la periferia de las ciudades. (Corral Sánchez, 2012). La meta nacional para vivienda de *Infonavit* en 2010 fue de 465,000 viviendas de las cuales 65,705 (14.1%) fueron programadas para el Distrito Federal y el Estado de México. En Julio de 2010 la oferta disponible era de 18,151 viviendas. (Infonavit, 2010)

1.1.3 Situación Actual de la Vivienda Social en México

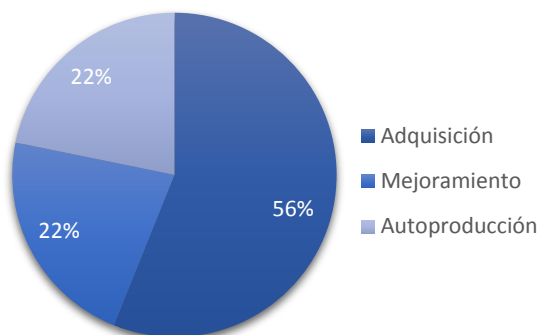
En el informe Situación Actual de la Vivienda en México 2012, se expone que la adquisición de un nuevo hogar representa la mayor cantidad de acciones de vivienda (56.1%), el mejoramiento representa también un porcentaje significativo (22.1%) superando a la autoconstrucción (21.8%) lo que indica una necesidad de adecuar el espacio existente ya sea por deterioro o ineficiencia. Gráfica 1.

El abandono de vivienda implica un desperdicio de la inversión inicial para la infraestructura, servicios y urbanización en general que se desarrolló en terrenos naturales. Es claro que la deficiencia de la calidad de vida en la vivienda social del *NZMCM* no recae únicamente en el confort térmico⁶ (SHF, 2005-2012), sin embargo, la adecuación de la vivienda ya sea con el objetivo de mejorar el confort interior o las condiciones generales del edificio puede propiciar la densificación de estos espacios abandonados.

El modelo de vivienda horizontal ha dejado de tener impulso por parte del gobierno como se indicó en el *Diario Oficial Mexicano* presentado el 30 de abril del 2014. (Gobierno Federal, 2014) “*El tipo de viviendas que se construyó entre 2007 y 2012, es mayoritariamente horizontal [...], lo cual pudo ser uno*

⁶ Factores como movilidad, lejanía de servicios, equipamiento urbano y seguridad son indicadores del abandono de la vivienda

de los factores causantes del proceso de expansión de las manchas urbanas. No obstante lo anterior, ha ido disminuyendo la construcción de este tipo incrementándose la vivienda vertical”, una de las estrategias para controlar la expansión de manchas urbanas, expuesto en el mismo documento, es “estimular, entre desarrolladores de vivienda, la construcción de vivienda vertical de calidad con espacios recreativos buscando ciudades con crecimiento ordenado”.



Gráfica 1. Acciones para solucionar la demanda de Vivienda en México.
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Secretaría Hipotecaria Financiera.

Los modelos de sociedad en México se han desarrollado y modificado en función de una economía variable y un crecimiento demográfico acelerado. Arquitectos y urbanistas se han visto en la tarea de diseñar ciudades que funcionen eficientemente aplicando ideas y esquemas extranjeros pero al final del día es la sociedad quien moldea, modifica y construye un entorno que le permita cumplir sus necesidades provocando un crecimiento desordenado a los ojos del urbanista pero inevitable para un ciudadano que busca resolver sus necesidades. El diseño formal queda entonces en segundo plano, como una utopía de la ciudad ideal con el ciudadano ideal y se enfatiza en su principal tarea que es resolver los conflictos de una ciudad viva, reflejo de su sociedad.

1.1.4 Vivienda Social y Confort térmico.

A pesar de la decisión expuesta en el *Diario Oficial Mexicano*, el número de viviendas que fueron construidas bajo el modelo horizontal sigue estando presente, con índices deficientes de calidad. La Sociedad Hipotecaria Federal realiza evaluaciones anuales por medio de encuestas que tienen como objetivo “Evaluar el grado de satisfacción de la población residente de vivienda en conjuntos habitacionales [...] que han sido individualizadas a través de Sofoles/Sofomes, Bancos, Infonavit y FOVISSSTE” (SHF, 2005-2012). Dentro de la evaluación, se consideran cuatro aspectos principales:

1. Características físicas de la construcción

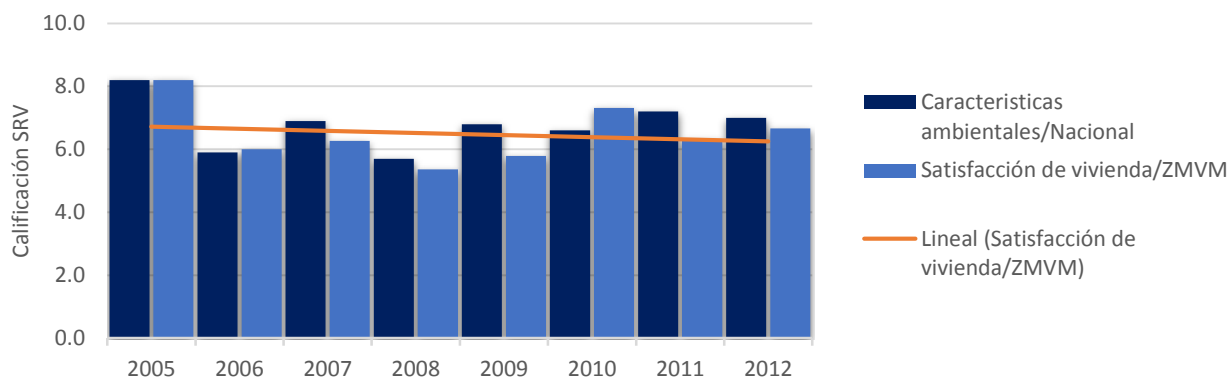
2. Características espaciales y funcionales
3. Adaptación t Transformaciones
4. Para los fines del documento, se presentan los resultados de los últimos años, referentes a las características ambientales, que incluye el aislamiento térmico, aislamiento acústico e iluminación.

Tabla 1.

Escala de Calificaciones para la Evaluación del Nivel de Satisfacción Residencial.

Calificaciones SHF	Nivel de Satisfacción
ISR 5 (+/-)	Nada satisfactorio
ISR 6 (+/-)	Poco satisfactorio
ISR 7 (+/-)	Satisfactorio bajo
ISR 8 (+/-)	Satisfactorio medio
ISR 9 (+/-)	Satisfactorio alto

Nota: Elaboración propia en base a SHF, Satisfacción Residencial 2005-2012, México.



Gráfica 2. Índice de Satisfacción Residencial en la República Mexicana en base a la escala de calificaciones para la Evaluación del Nivel de Satisfacción Residencial en la ZMVM en los últimos años. Fuente: Elaboración propia en base a SHF, Satisfacción Residencial 2005-2012, México

Como se puede observar en la Gráfica 2, la calificación de la satisfacción residencial se encuentra entre seis y siete puntos, lo que indica un índice poco satisfactorio, es importante considerar que la encuesta se realiza en todo tipo de viviendas, desde residencial plus hasta vivienda social, si se retoma la afirmación de Levins y Lewontin expuesta al principio del documento, la vivienda social tendía un índice aún menor que el indicado en los promedios de la gráfica.

1.1.5 Adaptación de la Vivienda en México

Actualmente, existen iniciativas de gobierno como Desarrolladores Urbanos Integrales Sustentables (DUIS), el Plan Nacional de Desarrollo o el Programa Nacional de Vivienda que se han visto en la tarea de mejorar la calidad de vivienda ofrecida. En el 2011, se expide la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 Eficiencia Energética en Edificaciones.- Envolvente de Edificios para Uso Habitacional, con el

objetivo de disminuir la ganancia de calor de las viviendas a través de su envolvente para disminuir el uso de energía en sistemas de enfriamiento (Corral Sánchez, 2012). Dado que en el área Metropolitana el uso de aire acondicionado y calefacción no es una necesidad básica en la vivienda social, el ahorro energético por sistemas activos de climatización pasa a segundo término aun cuando no se logren los niveles óptimos de confort.

Organismos de vivienda presentaron iniciativas para el mejoramiento de las viviendas, el Instituto de Vivienda *INVI* brinda apoyos a vivienda ubicada en suelo urbano con su Programa de Mejora de Vivienda⁷; El Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores *INFONAVIT* brinda un crédito destinado a mejorar la vivienda y un monto extra por *hipoteca verde* si las modificaciones están enfocadas a reducir el impacto ambiental de la vivienda, estas iniciativas son apoyadas por organismos como *CONUEE*, *SEDESOL* y *SHF*, sin embargo, estos apoyos no consideran el confort térmico como una prioridad que debe ser solucionada para mejorar la calidad de vida de los usuarios de las viviendas ocupadas y propiciar la ocupación de viviendas abandonadas al mejorar las condiciones interiores. Tampoco existe una *guía* por parte del gobierno que oriente al usuario sobre las posibles soluciones que existen en el mercado y cuál es la más conveniente de acuerdo a las características de su vivienda⁸.

1.2 Planteamiento y delimitación del problema

El fenómeno de Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que se presentó desde finales de la década de 1980 generó la construcción acelerada de viviendas con deficiencias en el confort térmico interior. A pesar de los nuevos programas de mejora de vivienda, no existe una iniciativa que suscite cumplir con las condiciones interiores de confort térmico ya sea en la construcción de nuevas viviendas o en la renovación o adecuación de viviendas existentes, tampoco hay indicadores estadísticos que muestren las condiciones térmicas al interior de la vivienda social en México ni una iniciativa que busque mejorar dichas condiciones.

La adecuación de la envolvente puede resultar una solución ante la problemática, sin embargo, no se han generado pautas que orienten al usuario hacia la opción que le beneficie en mayor medida de acuerdo a las condiciones de su vivienda por lo que esta investigación se orientará al diseño y evaluación de soluciones

⁷<http://www.invi.df.gob.mx/portal/programas.aspx>

⁸ En países como Alemania, Turquía y Singapur existen subsidios con investigaciones previas que justifican la inversión y acotan las mejores soluciones de acuerdo a las características de la vivienda y al clima (Mourtada, 2013), (Galvin, 2013), (Building and Construction Authority of Singapore, 2013).

constructivas para mejorar el confort térmico interior, considerando las opciones factibles de acuerdo a disponibilidad en el mercado y su eficiencia con respecto al confort.

1.3 Objetivo general

Promover la rehabilitación de la envolvente de la Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México para mejorar las condiciones de confort térmico y aportar información sobre el desempeño térmico de los sistemas constructivos de la envolvente para las nuevas construcciones de Vivienda Social para el clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México⁹.

1.4 Hipótesis general

La correcta selección de soluciones constructivas en la envolvente de la Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México mejorará los niveles de confort térmico interior.

1.5 Motivación para elaborar la investigación

La vivienda social se encuentra en una posición vulnerable, donde la calidad del producto ofrecido se mantiene con los estándares más bajos de calidad tanto en el interior de la vivienda como en el conjunto habitacional por lo que es necesario definir las condiciones de dichas viviendas para conocer la gravedad de la situación y proponer una solución.

El proyecto de investigación aportará información relevante sobre adecuaciones a la Vivienda Social que puede servir como referencia para las modificaciones formales e informales a la vivienda de manera que la inversión de dicha acción tenga un sustento válido, la información generada también puede servir como referencia para identificar las condiciones que propician los niveles de confort térmico interior más desfavorables y evitarlas en futuras construcciones.

1.6 Procedimiento

El desarrollo de la investigación tuvo un proceso lineal, comenzando por la investigación del marco teórico, en esta etapa se identificaron los principales autores teorías y publicaciones que servirían como referencia para el sustento teórico de la investigación. Una vez estudiados los temas relevantes, se formuló la metodología que daría pauta a la investigación de acuerdo a los objetivos y a la hipótesis del protocolo de investigación, en la cual se comienza por el análisis climático del sitio para definir las condiciones generales del ambiente y definir el rango de confort térmico.

⁹ El objetivo de la investigación se acota al clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México sin embargo los resultados pueden servir como referencia para los mismos fines en climas con condiciones similares.

Se realizó una investigación de la población y las características del sitio, la vivienda y el usuario para reflejarlas como variables en la muestra de población o *Universo de Estudio* el cual fue evaluado de acuerdo a las condiciones establecidas para determinar si la temperatura interior se encontraba o no en el rango de confort térmico definido para la zona. Una vez identificadas las viviendas que no cumplieron dicha condición, se propusieron adecuaciones en la envolvente con el fin de mejorar el confort térmico interior.

Las viviendas fueron evaluadas con la integración de las adecuaciones para verificar la mejora en el desempeño térmico de la vivienda, los casos con resultados positivos fueron analizados y documentados. Los resultados de las evaluaciones realizadas y su análisis fueron documentados por tipo de adecuación. Por último se realizó la síntesis de resultados y conclusión.

1.7 Desarrollo del documento

El documento se divide en ocho capítulos: Introducción, Marco Teórico, Marco Conceptual, Marco Metodológico, Caso de Estudio, Evaluación de Universo de Estudio, Diseño de Soluciones Constructivas, Evaluación de Soluciones Constructivas y Conclusión.

En la *Introducción* se describe los antecedentes de la vivienda social en México y el desarrollo de la *ZMCM* a lo largo del tiempo para colocar al lector en un panorama global sobre el tema que le permita conocer el pasado para poder reflexionar sobre el tipo de desarrollo o crecimiento y entender las causas de la situación actual, a partir de esta reflexión se presentan los problemas o inquietudes que se encontraron y el alcance de la investigación como respuesta a ellos, tal respuesta esta expresada como un objetivo general de la investigación: ¿Qué es lo que se busca obtener de este proyecto? Para resolver esta duda fue necesario formular una hipótesis donde se proyectan los resultados obtenidos de la investigación que permitirán lograr el objetivo planteado, en este bloque también se describe la motivación para elaborar la investigación y el procedimiento que se siguió para desarrollar el trabajo, por último se describen de manera general los resultados obtenidos en el trabajo de investigación y las aportaciones del mismo.

En el *Marco Teórico* se presenta casos análogos nacionales y extranjeros de la rehabilitación de la envolvente ya sea para mejorar el confort térmico interior o la eficiencia energética del edificio, analizando brevemente la metodología empleada y los resultados obtenidos. Dentro de este bloque también se presentan los avances del conocimiento en los temas incluidos en la investigación los cuales se mencionan brevemente a continuación:

Confort térmico: Se explican las teorías planteadas por los principales autores, el enfoque cualitativo y cuantitativo, la discusión de ambos y los juicios para incluir el modelo cualitativo en la investigación.

Balance Térmico: En este apartado se analiza y explica el cálculo del balance térmico y sus variables como las propiedades termo físicas de los materiales y como afectan en el desempeño de un sistema en equilibrio y las características del usuario y las ganancias latentes de un espacio.

Rehabilitación de vivienda y confort: Se enuncian los principales proyectos de rehabilitación en vivienda para mejorar los niveles de confort interior, las publicaciones hechas en México y su situación a nivel global, se exponen metodologías, técnicas y herramientas usadas en dichos proyectos.

En el *Marco Conceptual* se sintetizan los conceptos base de la investigación y la relación entre ellos. En el cuarto bloque se desarrolla el *Marco Metodológico*, donde se describen los objetivos y resultados que se buscan lograr por lo que fue necesario formular una hipótesis y supuestos que proyectaran la solución de objetivos a partir del seguimiento del método. Dentro de esta sección también se plantean las preguntas de investigación que surgen a partir del planteamiento del problema y de los objetivos generales y específicos, por último se describe la metodología seleccionada, su aplicación al proyecto y las herramientas de trabajo necesarias.

En el capítulo *Caso de Estudio* se presentan las características climáticas del *NZMCM* y los requerimientos bioclimáticos de acuerdo al análisis previo. También se presenta el modelo de simulación numérica generado en estudios previos, su calibración y las variables aplicadas para generar el Universo de Estudio. En la *Evaluación del Universo de Estudio* se muestran los resultados obtenidos en el proceso experimental; en el *Diseño de Soluciones Constructivas* se exponen las propuestas de adecuación de acuerdo a las consideraciones previas para cada tipo de requerimiento, y en la *Evaluación de Soluciones Constructivas* se muestran resultados obtenidos en el proceso experimental de las muestras una vez aplicadas las soluciones constructivas. Por último, en la *Conclusión* se presentan los análisis, observaciones y conclusiones de los resultados obtenidos.

1.8 Resultados y Aportaciones

La información extraída de la evaluación del Universo de Estudio es:

- Temperatura operativa interior en cada vivienda.
- Balance térmico de los componentes de la envolvente de cada vivienda.
- Temperatura operativa interior en cada vivienda con adecuación.

El análisis de dicha información permite:

- Relacionar el nivel de confort térmico interior con el tipo de sistema constructivo de la envolvente.

- Relacionar el nivel de confort térmico interior con el tipo de usuario.
- Relacionar el nivel de confort térmico interior con el tipo de orientación.
- Relacionar el desempeño térmico de cada sistema constructivo de la envolvente con el nivel de confort interior.
- Relacionar desempeño térmico de cada sistema constructivo con el tipo de usuario y con el nivel de confort interior.
- Relacionar desempeño térmico de cada sistema constructivo con la orientación de la vivienda y con el nivel de confort interior.
- Identificar las mejores adecuaciones a la envolvente para mejorar las condiciones térmicas interiores.
- Identificar la mejor adecuación por caso de vivienda.
- Identificar las soluciones adecuadas para cada tipo de vivienda dentro de las variables integradas.
- Generar recomendaciones para la construcción de nueva vivienda en el *NZMCM*.

2. Marco Teórico

2.1 Confort Térmico

La comodidad es subjetiva y depende de la edad, género, cultura e incluso condiciones financieras. Los arquitectos tienen como objetivo proporcionar espacios con las condiciones óptimas para la mayoría de los usuarios pero tomando en cuenta que el confort se ve afectado por factores como actividad, ropa, edad y sexo de la persona, y los aspectos del medio interno como la temperatura del aire, temperatura de la superficie, la humedad, el movimiento del aire, el ruido, la luz e incluso los olores, el tema puede dividirse en confort térmico, confort visual, calidad del aire interior y confort acústico (Architectural Central Europe, 1999)

El confort térmico entonces, es definido como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico, (ASHRAE, 2010) la definición es muy relativa y se basa en el principio de que “...*si se produce un cambio tal que produzca molestias, las personas reaccionan en maneras que tienden a restaurar su comodidad*”. (Nicol, 2011).

Givoni extiende la definición mediante la adición de la temperatura del cuerpo humano y afirma que el mantenimiento de un equilibrio térmico entre la temperatura del cuerpo humano y su medio ambiente es fundamental. Se trata de mantener la temperatura de los tejidos del corazón dentro de un rango estrecho, independientemente de las relativamente amplias variaciones en el entorno externo. (Givoni, 1976)

Olgyay categorizó los principales elementos de entorno climático como: temperatura del aire, la radiación, el movimiento del aire y la humedad (Olgyay, 1992). Sin embargo, en contraste con las respuestas fisiológicas que pueden ser medidas objetivamente, la determinación de las respuestas sensoriales subjetivas depende de la *auto-evaluación* de una persona expuesta a un entorno determinado. Esta evaluación no es estática sino que varía con los diferentes individuos y también con la misma persona en diferentes momentos. (Givoni, 1976).

Sue (Sue, et al., 2009) define las respuestas sensoriales descritas por Givony como procesos conscientes como cambio de arropamiento o inconscientes como tensión muscular afirmando que el confort térmico es un objetivo que el habitante siempre buscará. Estos procesos o acciones fueron clasificados en cinco principales.

1. Regular la tasa de generación de calor en el cuerpo
2. Regular la tasa de pérdida de calor en el cuerpo
3. Regular el ambiente térmico
4. Seleccionar un ambiente térmico diferente

5. Modificar las condiciones de confort fisiológicas del cuerpo

Para edificios naturalmente ventilados, la condición propia del modelo adaptativo de confort resulta el más conveniente debido a que el confort térmico dependerá en mayor medida de la posibilidad del usuario para *adaptarse* al espacio y de su propia respuesta de adaptación a diferencia del modelo estático en el cual el nivel de confort se establece a partir de un balance térmico para un usuario con un nivel de actividad específico (Fanger, 1970).

Morgan y de Dear (Morgan, 2003) establecieron la condición del modelo adaptativo:

Es esencial que los ocupantes de un edificio tengan la libertad de adaptarse por medio de su arropamiento al régimen variable de clima interior que prevalece en dichos edificios.

Para definir los niveles óptimos de temperatura al interior de los espacios para lograr un confort térmico en base a un modelo adaptativo, se realizaron numerosos estudios de campo usando encuestas y mediciones y en base a un análisis de regresión lineal, el rango adecuado de temperatura se formula como una ecuación en función al punto donde la recta de regresión corta el eje de las ordenadas (b), la pendiente de la recta de regresión (m) y a la temperatura exterior promedio (Tem).

$$Tn = b + m(Tem)$$

Diversos autores han creado su propia ecuación de confort térmico, los principales modelos de confort adaptativo se muestran en la Tabla.

Tabla 2.

Valores de b y m propuestos por principales autores de modelos de confort.

Autor	b	m
Humphreys (1976)	11.9	0.534
Aluciems (1981)	17.6	0.310
Griffiths (1990)	12.1	0.534
Nicol et al (1993)	17.0	0.380
Brager, De Dear (1998)	17.8	0.310
Humpheys-Nicol (2000)	13.5	0.540

Nota: Fuente:Elaboración propia en base a: El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados (Azpeitia, et al., 2007)

A partir del 2004, ASHRAE incluye un apartado para edificios ventilados naturalmente donde aplica la ecuación de Brager y De Dear para determinar rango de confort mínimo y máximo al interior de los espacios, en la Figura 4 se muestra la carta de confort adaptativo incluida en el ASHRAE Standard 55-2010.

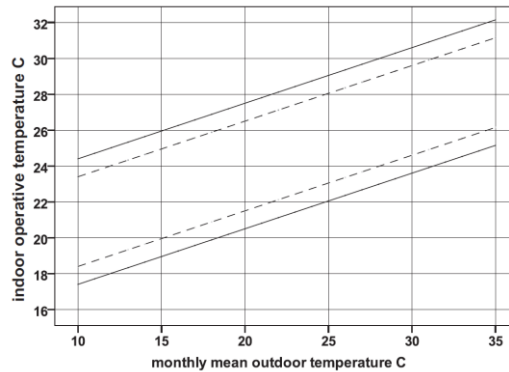


Figura 4. Temperaturas operativas aceptables al interior de los espacios. Fuente: ASHRAE, 2010.

El modelo adaptativo de regresión lineal para obtener la T_n de acuerdo a ASHRAE Standard 55-2010 se muestra a continuación.

$$T_n = 17.8 + 0.31(T_{em})$$

Los rangos aceptables de Temperatura Operativa interior se muestran en la Figura 4 y fueron especificados como $T_n \pm 3.5$ para el 80% de aceptación general (línea punteada) y $T_n \pm 2.5$ para el 90% de aceptación general (línea continua).

Las vivienda social del *NZMCM* funciona con ventilación natural, es decir, no cuenta con sistemas de aire acondicionado ni calefacción por lo que los usuarios *modifican* en la medida de lo posible las condiciones interiores de vivienda a su forma de vida y *se adaptan* a su vez a las condiciones del espacio al adquirir hábitos que responden a las condicionantes de la vivienda por los que los parámetros de confort para edificios ventilados naturalmente incluidos en ASHRAE Standard 55-2004 serán aplicados a la investigación como el modelo a seguir para definir el confort térmico.

2.2 Balance Térmico del Edificio

Para poder describir la importancia de los sistemas constructivos en las condiciones térmicas interiores de la vivienda y por lo tanto en el confort térmico, es necesario describir leyes básicas de termodinámica y explicar los fenómenos que ocurren en los elementos que componen la vivienda visto como un sistema.

Toda materia posee una cantidad de masa y una cantidad de energía. Estos dos valores están relacionados y podemos asumir que las cantidades totales nunca cambian (Haciendo referencia a las leyes de conservación de masa y conservación de energía respectivamente). La explicación de este fenómeno es

explicado por M.R. Hall y D. Allison en el libro *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings* (Hall, 2010) y se describe a continuación.

La energía es descrita formalmente como la capacidad de un sistema de realizar un trabajo y puede presentarse como energía potencial y energía cinética. La energía interna de un cuerpo es la suma de la energía cinética y potencial entre sus átomos y moléculas, es medida en Joules y se manifiesta como la propiedad física de temperatura o como la temperatura termodinámica y se expresa en °C.

Cuando la temperatura de un material es más alta en una región que en otra, la energía de dicho material tenderá a moverse desde el cuerpo más caliente hacia el cuerpo más frío hasta que se logre un equilibrio de temperatura, este fenómeno es llamado energía calorífica. La transferencia de masa, en cambio, ocurre cuando un material tiene un nivel de concentración más alto en una región y la masa tenderá a moverse a una región con menor concentración.

2.1.1 Leyes de Termodinámica

Hall explica la primera ley de termodinámica con la frase *calor es trabajo y trabajo es calor*, donde el trabajo es la propiedad física fundamental de la termodinámica y es descrita como un movimiento en contra de una fuerza con dirección opuesta, mientras que el Joule es igual a la energía necesaria para que 1 Newton de fuerza empuje un objeto un metro.

La energía de un sistema puede ser cambiada ya sea porque el sistema realice un trabajo, se realice un trabajo en el sistema o transfiriendo energía desde o hacia un sistema en forma de calor. De acuerdo a sus características, existen varios tipos de sistemas: Un *sistema abierto* es aquel en donde la materia y la energía pueden entrar y salir libremente; un *sistema cerrado* sólo la energía puede entrar o salir; en un *sistema aislado* ni el material ni la energía pueden entrar o salir; en un *sistema no aislado* la energía interna puede ser intercambiada por la transferencia de masa, transferencia de energía calorífica o por el sistema realizando un trabajo; un *sistema adiabático* es aquel que en teoría no hay transferencia de calor.

La segunda ley puede explicarse por medio de la afirmación de que la energía calorífica no puede pasar de un cuerpo a un cuerpo más caliente, lo que indica que el proceso natural de transferencia de calor es irreversible ya que el calor no puede pasar a través de dos cuerpos en equilibrio térmico. Esta *incapacidad* de trabajo de la energía se conoce como entropía. La tercera ley de termodinámica establece que para un cuerpo sólido perfectamente cristalino a temperatura 0°K, la entropía será igual a cero. Por último, la ley *Zeroth* establece que si dos sistemas no aislados están en equilibrio con un tercer sistema, entonces todos los sistemas están en equilibrio entre sí.

El calor específico de un material, es la energía requerida para elevar la temperatura de 1 kg de material 1°K por lo que si la temperatura de un material cambia, el calor específico determinará cuanto tiempo es necesario para que el gradiente de temperatura se forme en dicho material.

2.1.2 Leyes de Conservación

De acuerdo a la *ley de conservación de la materia*, la suma de las masas entrando y saliendo de una coalición debe ser igual; la *ley de conservación del tiempo* establece que la suma de los momentos entrando y saliendo de una coalición deben ser igual y por último, la *ley de conservación de la energía* establece que la suma de la energía de las moléculas coaligando debe ser igual antes y después de la coalición. Siguiendo la segunda ley de la termodinámica, si una de las moléculas tiene mayor temperatura antes de la coalición, la energía se transferirá en forma de calor dese la molécula caliente hacia la molécula fría.

2.1.3 Transferencia de Calor

La transferencia de calor es la transmisión de energía que resulta de la diferencia de temperatura. Para espacios ocupados, esta transferencia de calor puede ser algo indeseable como la pérdida de calor por muros en invierno o la ganancia de calor a través de las ventanas en verano. Para poder controlar la temperatura en un espacio es necesario entender y buscar cuantificar los mecanismos por los cuales el calor es perdido y ganado, a continuación se explican los tres fenómenos de transferencia de calor: Conducción, convección y radiación.

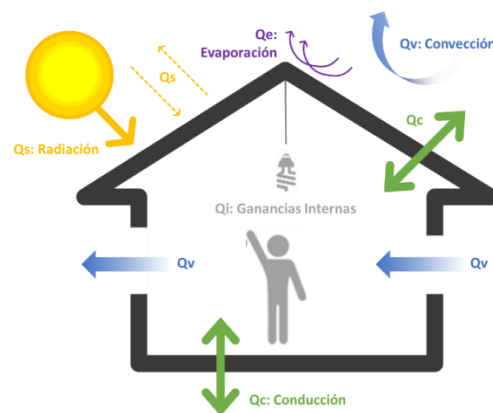


Figura 5. Procesos de intercambio de calor en el edificio para lograr un balance térmico. Fuente: Elaboración propia en base a (Watson & Labs, 1992).

El balance térmico en el edificio incluye procesos de conducción, convección, radiación, evaporación y ganancias de calor internas generadas por los ocupantes y equipos. El balance térmico, entonces, es el resultado de las ganancias y pérdidas de calor que suceden para lograr un equilibrio térmico (Figura 5). y se

expresa en la siguiente ecuación. Figura 5. Procesos de intercambio de calor en el edificio para lograr un balance térmico. Fuente: Elaboración propia en base a .

$$Q_i + Q_s + - Q_c \pm Q_v - Q_e = 0$$

Los procesos mencionados se describen a continuación.

Conducción

La conducción térmica es la transferencia de energía interna (calor) que ocurre entre moléculas ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso y entre diferentes materiales que se encuentren en contacto directo. El grado de transferencia de calor por conducción es proporcional al gradiente de temperatura y el coeficiente de proporcionalidad es conocido como conductividad térmica λ (W/mK). El valor U (W/m²K) de un sistema constructivo será la suma la conductividad térmica de cada material por un espesor específico d (m).

Convección

La convección ocurre cuando el movimiento de dicho fluido se lleva a las moléculas de la fuente de calor. En el análisis de los sistemas constructivos, la convección es usada para describir el cambio de calor por el efecto del aire en una superficie. Para los cálculos de Balance térmico, ASHRAE define un algoritmo incluido en los cálculos de convección de EnergyPlus (Anon., 2009).

Radiación

La radiación térmica es la radiación electromagnética de un cuerpo a otro como resultado de su temperatura. Todos los cuerpos con una temperatura arriba del cero absoluto emiten cierta radiación térmica en un espectro de longitudes de onda. Un cuerpo negro es definido como un cuerpo que absorbe toda la radiación incidente a cualquier temperatura y longitud de onda, sin embargo, las superficies reales sólo absorben un porcentaje de radiación mientras reflejan e incluso transmiten radiación térmica y este fenómeno varía dependiendo la temperatura y la longitud de onda.

Evaporación

La evaporación es un proceso en es que las moléculas adquiere suficiente energía (calor) para vencer la tensión superficial habiendo un cambio de estado líquido a estado gaseoso. En la envolvente de un edificio, el proceso de evaporación absorbe energía de la superficie provocando que la temperatura disminuya.

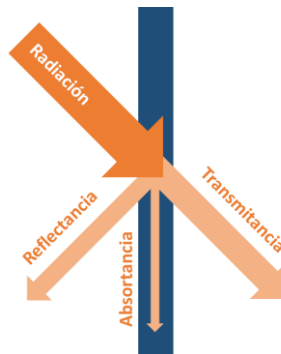


Figura 6. Propiedades superficiales de los materiales.
Fuente: Elaboración propia en base a (Energy Research Group, 2007)

Las propiedades superficiales de los materiales son la absorptancia (α) que indica la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material; la reflectancia (ρ) que indica la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie y transmitancia (τ) que indica la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo de manera que: $\alpha + \rho + \tau = 1$. La Figura 6 ilustra la ecuación.

2.3 Envolvente del edificio y su importancia en el Confort Térmico

La envolvente del edificio puede ser definido como el conjunto de elementos constructivos que separan al interior del edificio del medio ambiente exterior y es uno de los parámetros de diseño más importantes que determinan las condiciones interiores en relación al confort térmico, confort visual y productividad. (Wang, et al., s.f.). Haves confirma lo anterior estableciendo que el principal agente para el control de temperatura es la envolvente, y el mayor objetivo del diseño (solar) pasivo debe ser el maximizar su efectividad. (Haves, 1992)

Oral establece que el proceso de diseño de un proyecto debe incluir los parámetros relevantes que garanticen condiciones de confort térmico acústico y visual en un espacio, según el autor, los parámetros pueden ser propios del clima o características específicas de la envolvente a continuación, se mencionan aquellos parámetros establecidos por el autor que afectan directamente al confort térmico interior:

Parámetros Climáticos

1. Radiación solar
2. Humedad relativa
3. Velocidad del viento

Características de elementos opacos de la envolvente del edificio

1. Espesor de los materiales
2. Densidad de los materiales
3. Calor específico de los materiales

4. Coeficientes de conducción de calor de los materiales
5. Niveles de absorptancia y coeficientes reflexión solar de las superficies
6. Porosidad y la rugosidad de las superficies
7. Tipo de sistema constructivo (sencillo o en capas)
8. Tipo de conexión entre capas de materiales (puentes térmicos)

Características de elementos transparentes de la envolvente del edificio

1. Dimensiones del componente transparente
2. Número de capas del acristalamiento
3. Coeficiente de transmisión calor del material
4. Absorción, reflexión y coeficiente de transmisión de la radiación solar

Una vez explicado el proceso de transferencia de calor, y la importancia de la envolvente para el confort térmico interior, es posible justificar la rehabilitación de dicha envolvente para mejorar el desempeño térmico con el objetivo de incrementar los niveles interiores de confort térmico. A continuación, se expone el Estado del Arte en el tema de adecuación de vivienda y confort térmico.

2.4 Rehabilitación de Vivienda y Confort Térmico.

Las medidas de rehabilitación de un edificio o vivienda dependerán de los objetivos propios regidos por el tipo de clima (Krstic, 1998). Existen estudios que han propuesto la rehabilitación como una solución para mejorar las condiciones de espacios fuera de confort al modificar elementos constructivos de la envolvente en base a un análisis climático con el objetivo de aprovechar la estructura existente, disminuir el acelerado crecimiento de las manchas urbanas, disminuir el consumo y producción de nuevos materiales y mejorar condiciones de vida de usuarios que habitan las viviendas ineficientes o fuera de confort.

En la Tabla 3 se pueden observar los casos de estudio que son destinados a vivienda en países europeos; las adecuaciones propuestas no modifican los elementos estructurales y se enfocan a la envolvente. Los análisis térmicos se realizan con simuladores numéricos partiendo del monitoreo en sitio del espacio.

En México también existen estudios enfocados a la rehabilitación de edificios con un objetivo de ahorro energético aunque es notoria la falta de información en este rubro ya que el número de estudios y proyectos de investigación es menor que en otros países como se muestra en la Tabla 3, aun cuando el *Rezago Habitacional* en el país es cada vez mayor. A continuación se mencionan los proyectos de investigación que proponen la rehabilitación de edificios como una solución para mejorar el desempeño energético en México.

Tabla 4.

Sumario de Casos de Estudio de Rehabilitación de edificios para mejorar el desempeño térmico.

Referencia	Descripción del Edificio.	Tecnología de adecuación implementada.	Método de análisis.	Resultados obtenidos.
Verbeeck and Hens	Cinco edificios residenciales en Bélgica	Medidas aislantes y de acristalamiento.	Modelo de simulación del edificio y del Valor Neto Actual.	Aislamiento en techo, acristalamiento con mejor desempeño térmico fueron las medidas con mejores resultados y el acondicionamiento del techo fue la medida mas factible. Los ahorros energéticos fueron del 10% al 30% pero también se implementaron mejoras en los sistemas de calentamiento.
Goldman et al.	Edificios multifamiliares	Adaptación de ventanas	Análisis de datos monitoreados.	
Cohen et al.	Edificios unifamiliares	Aislamiento de bsas, muros, cimentación y remplazo de ventanas.	Monitoreo y costos reales de adecuación	El aislamiento de lsas y muros fue efectivo financieramente con ahorros de 12% hasta 21%
Bin and Parker	Vivienda independiente de tabique de dos pisos construida en 1910	Aislamiento de alto nivel en techo, muros y cimientos. Reemplazo de ventanas y con aistanle de aire.	Análisis de ciclo de vida	El costo ambiental de la rehabilitación será recuperado en dos años, las renovaciones también representan un impacto ambiental.
Stovall et al.	Vivienda tipo en distintas locaciones	Rehabilitación de muros incluyendo revestimientos, agregando aislantes debajo del revestimiento y sellador de aire en ventanas.	Modelo energético y pruebas experimentales	Los ahorros monetarios anuales fueron del 10%, adaptaciones adicionales en las ventanas pueden aumentar el ahorro. Se aplicaron sistemas de calentamiento.
Nabinger and Persily	Vivienda deshabitada construida en el 2002	Instalación de doble fachada en muros y mejoras en el aislante existente.	Monitoreo en sitio	La pérdida de calor de la envolvente se redujo 18%, los sistemas de calefacción se mejoraron disminuyendo su filtración un 80% logrando un ahorro energético total del 10%
Doménech, V	Cubiertas de Edificios existentes en Madrid	Rehabilitación de cubiertas con aislantes comerciales	Simulaciones y evaluaciones de resultados térmicos y económicos.	La incorporación del aislamiento térmico como parte del mantenimiento representa un porcentaje económico pequeño en el presupuesto global por lo que puede ser una medida altamente rentable en ahorro energético y emisiones de CO ₂ .
G. Wadel et. al.	Vivienda plurifamiliar en el área de Playa de Palma	Adaptaciones propuestas tomando en cuenta criterios de energía, agua, materiales, residuos de construcción y emisiones de efecto invernadero	Modelo de simulación	Se logró disminuir el impacto ambiental un 50% respecto de la situación actual y de una rehabilitación estándar en un ciclo de vida de 50 años.
Simancas, K.	Viviendas de Segunda Residencia en clima Mediterráneo	Adaptaciones pasivas para ganancia y pérdida de calor y humedad por temporada	Análisis de confort térmico lumínico y acústico comparando ventajas y desventajas por decisión	Se propuso una adecuación a la envolvente así como sistemas pasivos y activos para disminuir el consumo energético, siendo las mejoras pasivas las que tienen mayores ventajas en cuanto a costo y beneficios obtenidos.

Nota: Elaboración propia en base al documento Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art (Ma, et al., 2012)

- *Eficiencia Energética en los Edificios* (Fernandez, 2011): Rehabilitación de fachadas o envolventes con aislamiento, los tipos de aislantes que hay y su aplicación.
- *Adecuación Bioclimática de La Vivienda de Interés Social del Noroeste de México con Base al Análisis Térmico de La Arquitectura Vernácula* (Carrasco & Morillón, 2004): Rehabilitación de la Vivienda con soluciones bioclimáticas enfocadas al confort simulando una Vivienda de Interés Social.
- *Eficiencia energética y sostenibilidad en viviendas de interés social: incidencia del material de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el confort higrotérmico interior*. (Alías & Jacobo, 2010): Incidencia de la envolvente para conservar el confort higrotérmico en la Vivienda de Interés Social.

2.5 Modelos de Simulación Numérica para la Evaluación Térmica de Edificios

Debido a la importancia que se ha dado a la eficiencia energética de los edificios, se han diseñado nuevos métodos para apoyar a los profesionales de la construcción en su esfuerzo por optimizar los diseños y crear un mejor rendimiento energético. De hecho, el campo de la investigación relacionada con el modelo de edificios y predicción del rendimiento energético es muy productiva incluyendo diversos dominios científicos entre los que se pueden distinguir los campos relacionados con la física, centrándose en la resolución de las ecuaciones para la simulación del comportamiento térmico y las relacionadas con las matemáticas que consisten en la aplicación de modelos de predicción por medio de técnicas de aprendizaje automático. A continuación se abordarán brevemente las principales técnicas usadas actualmente para la evaluación energética de edificios (Foucquier, et al., 2013) basados en la física:

- *Método CFD*: Este método es útil para identificar distribución específica de contaminantes en el aire, calidad de ambiente interior y sistemas HVAC. A partir de este método se puede obtener descripciones detalladas de las corrientes de fluidos que ocurren al interior de un edificio y en zonas de gran volumen aunque requiere un tiempo largo de cálculo y la implementación del modelo es compleja.
- *Método de zonas*: Sirve para obtener información de confort térmico interior y ventilación natural y artificial; con este método es posible establecer la distribución espacial y temporales local de variables locales como temperatura, presión, y flujo de viento aunque también requiere un tiempo largo de cálculo y una descripción detallada de los tipos de flujos.
- *Método nodal*: Este método se usa para determinar el consumo total de energía, el promedio de temperatura interior y las cargas de calentamiento y enfriamiento; permite calcular edificios con múltiples zonas en un tiempo de cálculo razonable con una fácil implementación

del modelo aunque resulta complicado estudiar sistemas de gran volumen y no es posible estudiar los efectos locales como fuentes de contaminación.

En la investigación se usa un método nodal ya que se evalúan varias zonas dentro del edificio y la información que se busca extraer del modelo es principalmente con referencia al confort térmico y cálculos de balance térmico de la envolvente. El modelo se generó por medio de la interfaz *DesignBuilder* donde se realizó la edición del modelo y la extracción de datos y *EnergyPlus 7.0*, es el software donde se realiza la simulación al realizar análisis de energía y cargas térmicas. *EnergyPlus* fue creado por el Departamento de Energía de Estados Unidos y es avalado por *IEA* (International Energy Agency) y *ASHRAE* (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers).

3. Marco conceptual

En la Figura 7 se muestra el marco conceptual de la investigación, el desarrollo y las relaciones de los elementos en ella y son descritos a continuación:

En el capítulo de antecedentes, se expuso el tipo de crecimiento que ha tenido la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y el cómo factores económicos y políticos principalmente, han propiciado un desarrollo de la Vivienda Social con deficiencias que se mantuvieron por varias décadas con un ritmo de construcción acelerado, dando como resultado una vivienda con bajos índices de calidad que se reflejan inevitablemente en el confort térmico interior, aunado a esto, la adecuación de la vivienda no está orientada a mejorar dicho confort por lo que en base a esta situación se plantea la problemática de la investigación.

Dentro del capítulo del Marco teórico, se mencionaron los conceptos que servirían como base para sustentar el trabajo; estos conceptos están encaminados al confort y al desempeño térmico de la envolvente. En el primer caso, se describe el modelo de confort que se considera válido dentro del estudio así como su justificación y en el segundo caso, se exponen brevemente las leyes termo físicas que refieren a la transferencia de calor en los materiales de la envolvente del edificio. El alcance de estos dos temas permite exponer la importancia de la envolvente en el confort térmico al interior de los edificios y la rehabilitación de la envolvente como una solución para mejorar el confort térmico.

El objetivo se plantea como resultado de la problemática expuesta con las bases teóricas como sustento para la hipótesis y desarrollo del proyecto, el cual está basado en un Universo de Estudio que a partir de datos estadísticos de la zona de estudio, representa una población de viviendas; la muestra se generó en modelos de simulación numérica los cuales permitieron una evaluación del confort térmico y un cálculo de balance térmico de la envolvente; retomando las bases teóricas mencionadas anteriormente, se realizó un diagnóstico del confort térmico en la población de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el diagnóstico y a las bases teóricas de la investigación, se propusieron soluciones constructivas. Los casos que presentaron resultados positivos para el confort térmico fueron registrados, y en el caso contrario, se propusieron alternativas o modificaciones en las propuestas hasta lograr la mejora en el confort térmico. La información generada fue registrada como conclusiones y recomendaciones al final del documento.

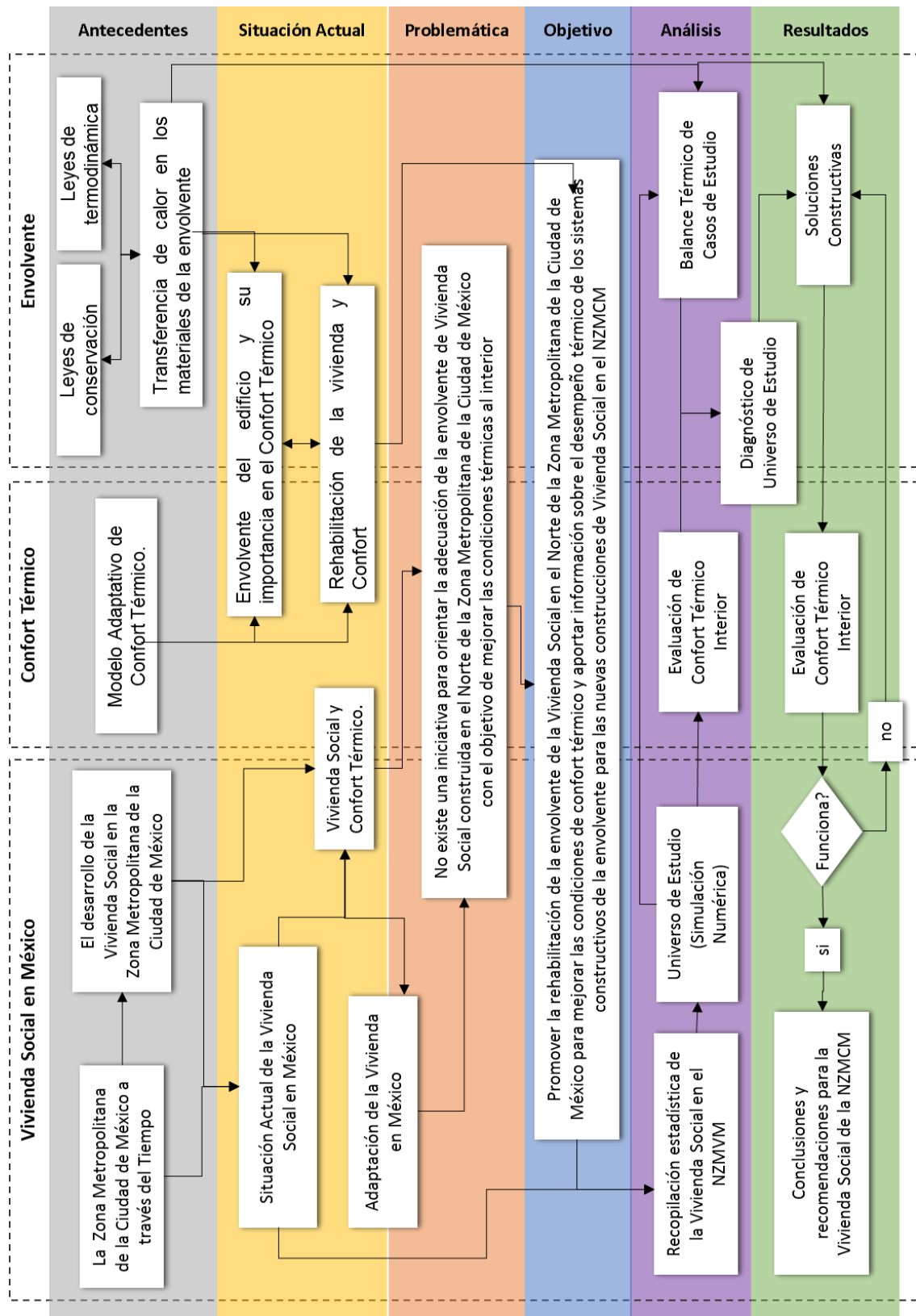


Figura7. Marco conceptual de la Tesis de Investigación. Fuente: Elaboración propia.

4. Marco Metodológico

4.1 Objetivos

4.1.1 *Objetivo general*

Diseñar y evaluar soluciones constructivas en la envolvente de la Vivienda Social en el *NZMCM* que mejoren el desempeño térmico y por lo tanto, el confort térmico interior a partir de una muestra estadística de modelos de simulación numérica.

4.1.2 *Objetivos particulares*

Los objetivos particulares de la metodología fueron establecidos de acuerdo al objetivo general de la tesis de investigación: *Promover la rehabilitación de la envolvente de la Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México para lograr niveles recomendados de confort* (ASHRAE, 2010) *y aportar información útil de la envolvente para las consideraciones constructivas de nuevas viviendas o edificios en NZMCM*. Y al objetivo general del marco metodológico enunciado anteriormente; estos se enlistan a continuación.

1. Realizar un análisis climático de la zona de estudio:
 - a. Recopilar y analizar información climática de la *ZMVM*
 - b. Calcular el rango de confort térmico en base al modelo adaptativo para edificios ventilados naturalmente (ASHRAE, 2010):
 - c. Definir principales requerimientos bioclimáticos y estrategias pasivas para el confort térmico.
2. Formar un Universo de Estudio *UE* que represente la población de vivienda social del *NZMCM*
 - a. Monitorear una vivienda social en la zona de estudio para obtener datos sobre las condiciones ambientales al interior.
 - b. Generar un modelo de simulación numérica con las características específicas de la vivienda monitoreada y extraer datos sobre las condiciones al interior.
 - c. Calibrar el modelo de simulación en base a los estándares de ASHRAE Guideline 14 a partir de los datos monitoreados y simulados para validar los datos de salida del modelo (Raftery, et al., 2011).
 - d. Establecer los datos estadísticos de la vivienda social en el *NZMCM* e identificar principales variables que afectan al confort interior.

- e. Generar una muestra de población con las variables estadísticas del *ZNVCM*.
3. Analizar el desempeño térmico de la envolvente.
 - a. Calcular el balance térmico de los elementos de la envolvente del *UE* y analizar los datos obtenidos para identificar las deficiencias en cada sistema constructivo.
4. Estimar los niveles de confort térmico al interior de la vivienda.
 - a. Calcular la Temperatura Operativa T_o al interior de la vivienda del *UE* y evaluarla con respecto al rango confort térmico establecido.
5. Diseñar medidas de adecuación en caso de que la vivienda se encuentre fuera de confort.
 - a. Establecer posibles adecuaciones para los requerimientos obtenidos en la evaluación de la T_o interior y al balance térmico.
6. Evaluar el desempeño térmico de la vivienda una vez integradas las adecuaciones para verificar la mejora en el confort térmico interior.
 - a. Implementar las adecuaciones correspondientes a los modelos simulación de viviendas del *UE*.
 - b. Calcular la temperatura operativa interior una vez integrada la adecuación.
 - c. Evaluar la mejora en el confort interior después de la adecuación de acuerdo al sistema constructivo, usuario y orientación
7. Analizar y documentar los resultados obtenidos.

4.2 Hipótesis o supuestos

La generación de un Universo de Estudio que represente la población de vivienda social en el *NZMCM* en base a modelos de simulación numérica permitirá evaluar en confort térmico al interior de dichas viviendas.

La evaluación del balance térmico del Universo de Estudio por medio de modelos de simulación numérica permitirá identificar los elementos de la vivienda que requieran adecuaciones para mejorar el confort térmico.

La implementación de adecuaciones en la envolvente de los casos de estudio mejorará los niveles de confort en el interior de las viviendas del Universo de Estudio.

4.3 Preguntas de investigación

- ¿Cómo es el clima en el *NZMCM*?
- ¿Cuál es el rango de confort térmico al interior de los edificios en el *NZMCM*?
- ¿Cuáles son las características generales de la vivienda social en el *NZMCM*?

- ¿Cómo afecta la envolvente en el desempeño térmico y en el confort térmico interior de la vivienda social en el *NZMCM*?
- ¿Cuál es el balance térmico de los elementos constructivos de la envolvente en la vivienda social en el *NZMCM*?
- ¿Cuál es el nivel de confort térmico al interior la vivienda social en el *NZMCM*?
- ¿Cuáles son las soluciones constructivas en la envolvente más apropiadas para mejorar el confort térmico interior en las viviendas en el *NZMCM*?
- ¿Cuál es la aportación de las soluciones constructivas en la envolvente al confort interior de las viviendas en el *NZMCM*?

4.4 Metodología

En el documento: *Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art* (Ma, et al., 2012), se presenta un método sistemático para la selección e identificación de las mejores medidas de adecuación para edificios existentes así como los problemas que se presentan en la rehabilitación de éstos; el objetivo principal del documento es el proveer la información necesaria para llevar a cabo un proyecto de rehabilitación de edificios con un enfoque sustentable. En laFigura8, se muestra un esquema base de las fases de diseño planteadas por Zhenjun.

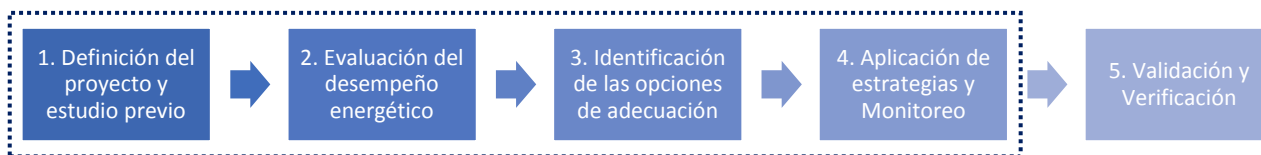


Figura8: Fases clave en la rehabilitación sustentable de un edificio. Fuente: Elaboración propia en base a *Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art*, Ma, et al., 2012

Como se muestra en el recuadro punteado de laFigura8, el alcance de este documento es la definición del proyecto y estudio previo y la evaluación del desempeño energético, que en este caso, será el confort térmico interior. A continuación se enuncian los pasos a seguir dentro de cada fase.

4.4.1. Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo

En esta etapa del proyecto, se recopiló la información del proyecto que influya en las condiciones térmicas interiores. De igual manera, se deben recopilar datos estadísticos de la población de estudio que permitan una representación con un Universo de Estudio. Ver Figura9.

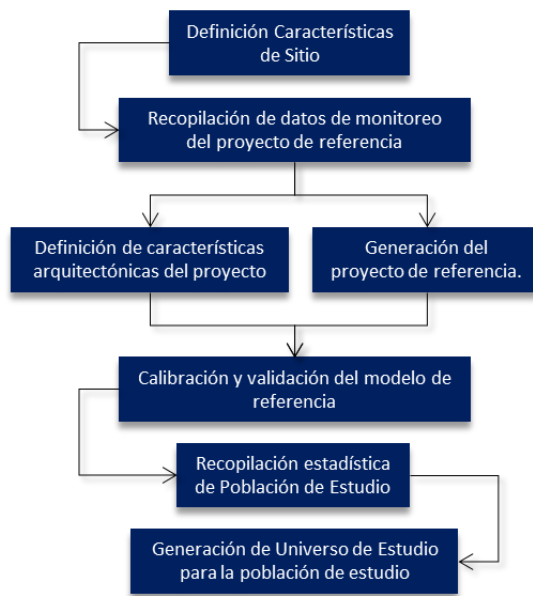


Figura9. Primera etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo, Fuente: Elaboración propia.

a) Definición de características del sitio:

En esta primera etapa se analizaron las características del sitio en el que se encuentra el proyecto de referencia por lo que datos de clima como temperatura de bulbo seco, humedad y radiación sirven para clasificar el tipo de clima. También se contemplan factores del sitio como la orientación de la vivienda, longitud latitud y altitud y las temperaturas del terreno.

b) Definición de confort:

En base al análisis de los datos climáticos, se planteó un primer alcance que permitió tener un panorama global de las condiciones de confort en el sitio de estudio para lo cual fue necesario analizar datos como rangos aceptables de confort, sensaciones térmicas y porcentajes de insatisfacción.

c) Recopilación de datos de monitoreo del proyecto de referencia:

La vivienda de referencia fue monitoreada en sitio durante tres meses obteniendo datos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa al interior de la vivienda.

d) Definición de características arquitectónicas del proyecto y generación modelo de referencia:

El modelo de simulación numérica se generó a partir de la información arquitectónica del proyecto. La información de factores como materiales de construcción, ocupación y tipo de acristalamiento son determinantes para el cálculo en el simulador.

e) Calibración y validación del modelo de referencia:

Para sustentar la información de salida del modelo de simulación numérica y evitar datos falsos, el modelo fue validado en base a estándares de referencia a partir del error calculado con la información de la vivienda monitoreada y la información de la vivienda simulada.

f) Recopilación estadística de población de estudio.

Se identificaron variantes representativas en la población de estudio que repercuten en las condiciones de confort térmico interior, las variables se jerarquizan para identificar aquellas con mayor número de casos y relevancia.

g) Generación de Universo de Estudio para la población de estudio.

El proyecto de referencia es modificado con la implementación de variables sustentadas de acuerdo a datos estadísticos de la zona de evaluación para generar un número de modelos de simulación x que representen la población de estudio, ver Figura9.

4.4.2. Evaluación del confort térmico interior

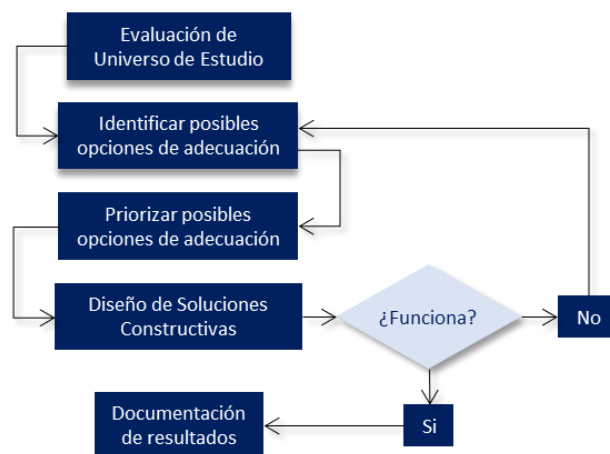


Figura10. Segunda etapa: Evaluación del confort térmico interior. Fuente: Elaboración propia.

El Universo de Estudio generado en la primera etapa del proyecto, fue evaluado a partir de simulaciones numéricas para identificar las deficiencias de la envolvente, en esta etapa, se propusieron y

evaluaron soluciones constructivas para identificar la mejor solución por caso. Los resultados son documentados, ver Figura 10.

a) Evaluación del Universo de Estudio.

Se realizaron simulaciones numéricas de los modelos del Universo de Estudio para obtener valores de temperatura operativa y de pérdidas o ganancias de calor de los elementos constructivos. Los valores obtenidos son analizados para generar un diagnóstico general.

b) Diseño de Soluciones Constructivas.

Se diseñaron las soluciones constructivas para mejorar el confort térmico de acuerdo a los requerimientos bioclimáticos y a la evaluación del Universo de Estudio.

c) Implementar adecuaciones y evaluar resultados

Se implementaron las soluciones en los casos correspondientes del Universo de Estudio y se simuló nuevamente los modelos para obtener los valores de temperatura interior y evaluar la solución.

d) Análisis y documentación de resultados

Los datos de temperatura operativa obtenidos en los modelos con adecuaciones son recopilados para analizar el aporte al confort térmico interior. En caso de obtener resultados favorables, estos se documentan, en el caso contrario, se repite el proceso metodológico.

4.5 Técnicas y herramientas para realizar la investigación

4.5.1 Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo

Para la primera etapa de la investigación, la mayor parte del proceso involucró la recopilación de datos. La definición del sitio se realizó a partir de datos climáticos de estaciones meteorológicas e información satelital extraída del programa *Meteonorm* 6.1®. El análisis de datos se realizó en las hojas de cálculo *Datos Climáticos*¹⁰, (Fuentes, 2011) y *Bioclimatic Analysis Tool*¹¹ (Rincón & Fuentes, 2014) ambas

¹⁰ Hoja de cálculo desarrollada por M.D. Julio César Rincón Martínez. División de Ciencias y Artes para el Diseño –Posgrado en Diseño y el Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet ffva@correo.azc.uam.mx. Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño - Departamento del Medio Ambiente.

¹¹ Hoja de cálculo desarrollada por el Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet ffva@correo.azc.uam.mx. Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño - Departamento del Medio Ambiente.

tablas permiten definir el clima e identificar sus principales características mensual y anualmente. Para conocer las condiciones físicas de la vivienda, como condiciones del terreno y colindancias fue necesario realizar visitas de campo. A partir de los datos climáticos se determinó el rango de confort de acuerdo al modelo adaptativo establecido por *ASHRAE*. (ASHRAE, 2010)

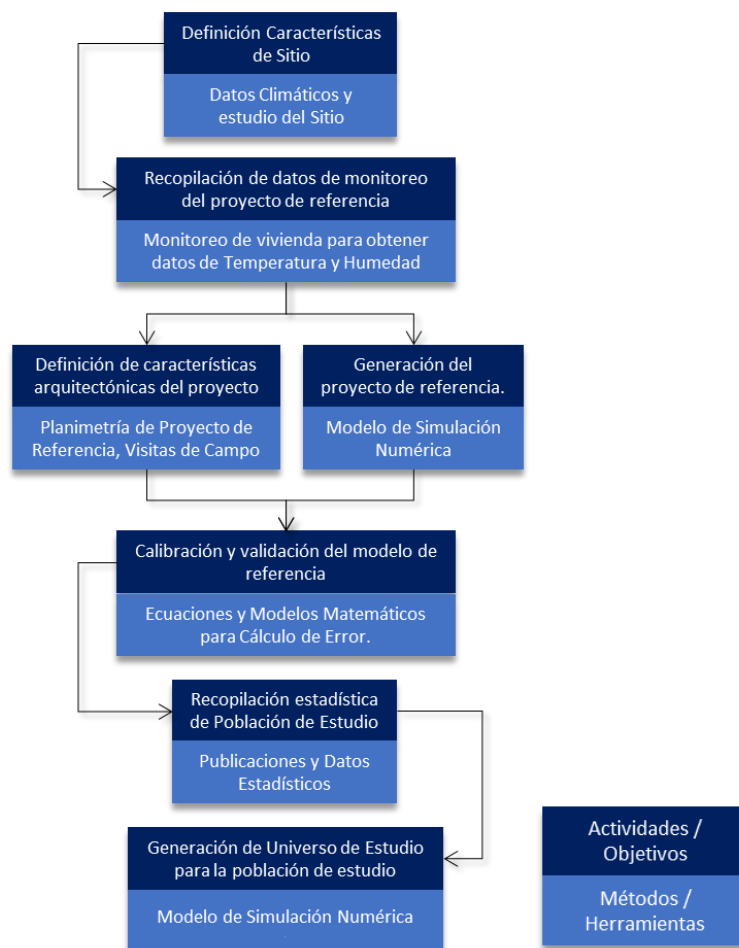


Figura11 Técnicas y herramientas para la primera etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo. Fuente: Elaboración propia.

El proyecto de referencia fue monitoreado para obtener datos horarios de temperatura del aire y humedad los cuales se obtuvieron con sensores tipo *Data Loggers* colocados de acuerdo a los estándares de referencia de *ASHRAE* para validar la información de salida. En caso de que el proyecto se encuentre ocupado, se deben obtener datos de ocupación por medio de encuestas. Las características arquitectónicas del proyecto se obtuvieron con los documentos de construcción. Fue necesario obtener información precisa

sobre los materiales constructivos y el tipo de acristalamiento como espesor y tipo para poder investigar las propiedades térmicas.

El modelo de referencia se generó con la información recopilada en el programa de simulación numérica *DesignBuilder*. A partir de la simulación del modelo se obtuvieron datos horarios de temperatura y humedad de las fechas en las que se realizaron las mediciones para poder calibrar el modelo. El modelo se calibró y validó de acuerdo al cálculo de los valores de error establecidos en *ASHRAE Guideline 14* (Raftery, et al., 2011). El cálculo contiene datos horarios de temperatura y humedad del proyecto de referencia monitoreado en sitio y calculado en la simulación numérica.

Se recopiló información estadística de la zona para identificar las variables que representan la población de estudio. Los datos necesarios para la investigación fueron informes de población, tipos de materiales constructivos y uso de tiempo de población. La última variable fue la orientación y se determinó en base a simulaciones del modelo de referencia para identificar aquellas en las cuales la temperatura interior presenta mayor variación. Una vez identificadas las variables, se generaron modelos en el programa de simulación numérica *DesignBuilder* con las combinaciones posibles entre variables, estos modelos fueron las muestras dentro del *UE*. Las técnicas y herramientas descritas anteriormente se pueden observar en la Figura 11.

4.4.1 Evaluación del confort térmico interior

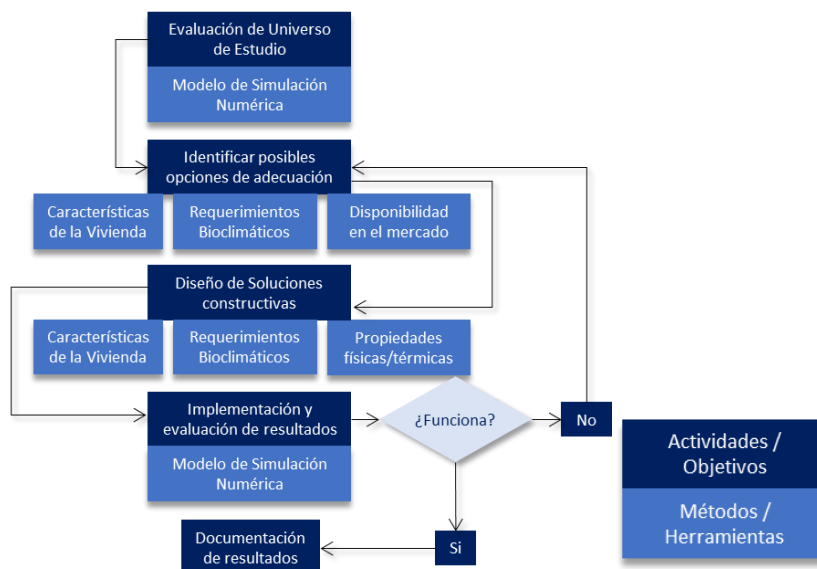


Figura 12. Técnicas y herramientas para la segunda etapa: Definición del Proyecto de Referencia y Estudio Previo.
Fuente: Elaboración propia.

En la segunda etapa se realizó un diagnóstico del *UE* (Figura 12), por lo que las muestras fueron simuladas para calcular la temperatura operativa interior anual de todo el proyecto y las pérdidas o ganancias de calor anuales en los elementos constructivos. La temperatura operativa es comparada con el rango de confort calculado para la zona de estudio para evaluar el nivel de confort térmico. Los elementos constructivos fueron ordenados jerárquicamente de acuerdo a las pérdidas o ganancias de calor para identificar los elementos y las variables que rigen el desempeño térmico.

De acuerdo a la evaluación del confort térmico, balance térmico, requerimientos bioclimáticos y disponibilidad de soluciones en el mercado, se propusieron e integraron las soluciones más pertinentes para cada caso, los modelos fueron simulados nuevamente para obtener la temperatura operativa después de la adecuación, la cual fue comparada con la temperatura operativa de la muestra original y con el rango de temperatura de confort para conocer el aporte de la adecuación al confort térmico interior. En caso de que éste sea favorable, se documentarán resultados, en caso contrario se volverá a identificar posibles opciones de adecuación hasta obtener los valores de Temperatura Operativa que cumplan con el rango de confort.

5. Caso de Estudio:

5.1 Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El proyecto de tesis da seguimiento al Proyecto Reglamentación Y Normatividad Para Arquitectura Bioclimática en el que se realizó el trabajo de investigación *Análisis Térmico Comparativo por Medio de Simulación Numérica de Tres Viviendas de Interés Social en Tres Diferentes Climas de La República Mexicana* (Figueroa, et al., 2013) en el que una vivienda de interés social fue monitoreada en sitio para registrar datos horarios de temperatura de aire y humedad al interior. Dentro de la misma investigación se generó un modelo de simulación numérica en el programa *DesignBuilder* para conocer su desempeño térmico y energético a lo largo del año.

La vivienda se localiza en el municipio de Nicolás Romero, ubicada en la Latitud 19°35' N, Longitud 99°16' O, a una Altitud de 2,406 msnm correspondiente al Norte de la Zona Metropolitana del Valle de México *NZMCM* aproximadamente a 30 km al noroeste a partir del centro de la ciudad (Zócalo). La estación meteorológica utilizada para este estudio es la número 00015019 (Colonia Vicente Guerrero) del Servicio Meteorológico Nacional y se ubica geográficamente en la latitud norte 19° 35' 44" N; longitud oeste 99° 21' 16" W y con una altitud de 2430 msnm. (Figueroa, et al., 2013).

5.2 Cálculo de Confort Térmico para el NZMCM

De acuerdo al modelo de confort adaptativo (ASHRAE, 2010), $T_n = (T_{med} * 0.31) + 17.8$ los rangos mínimos y máximos anuales de Temperatura Operativa para lograr el confort térmico en interior de edificios en el *NZMVM* son: para un 90% de satisfacción 20.09°C y 25.09°C respectivamente con una temperatura media de 22.59 °C. y para un 80% de satisfacción 19.09 y 26.09..

Considerando la Temperatura Media Exterior de cada mes, se puede obtener un rango de confort más preciso, en la Gráfica 3. Rango de Confort Térmico Mensual para un 80% y 90% de Aceptación. Fuente: Elaboración propia en base a Gráfica 3 se muestran las temperaturas de confort superior (ZC_s) e inferior (ZC_i) para un 80% y 90% de aceptación así como la Temperatura Neutra (T_n), como se puede apreciar, aunque anualmente, el rango se mantenga entre 20.09°C y 25.09°C para el 90% de aceptación, en enero ZC_i equivale a 18.14°C y en mayo ZC_s es de 25.76.

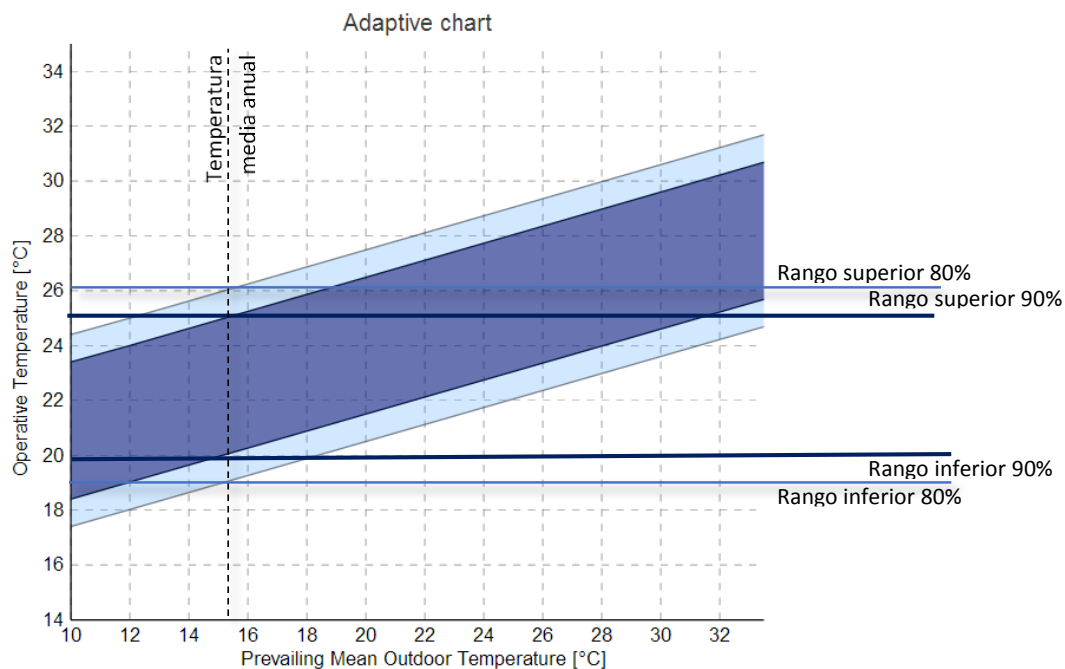
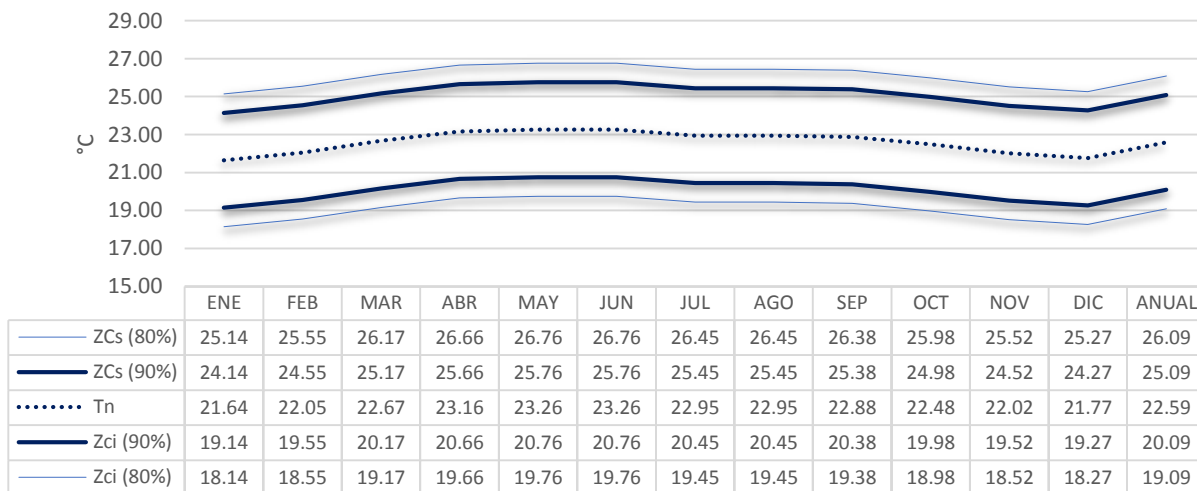


Figura. 13. Rangos mínimos y máximos de confort para el Norte de la ZMVM. Fuente: Elaboración propia en base a CBE Thermal Comfort Tool, 2013, Center for the Built Environment, University of California Berkeley.



Gráfica 3. Rango de Confort Térmico Mensual para un 80% y 90% de Aceptación. Fuente: Elaboración propia en base a (ASHRAE, 2010)

5.3 El Clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En el Reporte 2.a del Proyecto *Pautas para el Confort Ambiental y el Desempeño Energético de la Vivienda Urbana* de la *Red Arquitectura Bioclimática*, se generó un análisis del clima del NZMCM, a continuación, se presentan los puntos más relevantes de dicho informe con referencia a las condicionantes del clima que afectan al desempeño térmico de la envolvente.

De acuerdo con la clasificación de Köppen-García, el clima es templado con poca oscilación con clave *Cb wI(w) (i')g*. El desglose se enlista a continuación:

C: Clima templado, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C

b: Temperatura media del mes más caluroso inferior a 22 °C);

wI(w): Lluvias en verano con una precipitación invernal menor al 5%

i': Poca oscilación anual entre 5 y 7 °C

g: Clima tipo Ganges, en donde la temperatura más alta se presenta en primavera y no hay presencia de canícula.

El bioclima es Semi-frío seco, ya que la temperatura media del mes más caluroso es inferior a 21 °C y la precipitación total anual se encuentra entre los 650 y 1,000 mm.

5.3.1 Temperatura.

La temperatura media anual es de 15.5 °C, con una oscilación anual de 5.2 °C. El mes más caluroso es abril, con una temperatura media de 17.3 °C y una máxima de 27 °C y el mes más frío es enero con una temperatura media de 12.4 °C y una mínima de 3.5 °C.

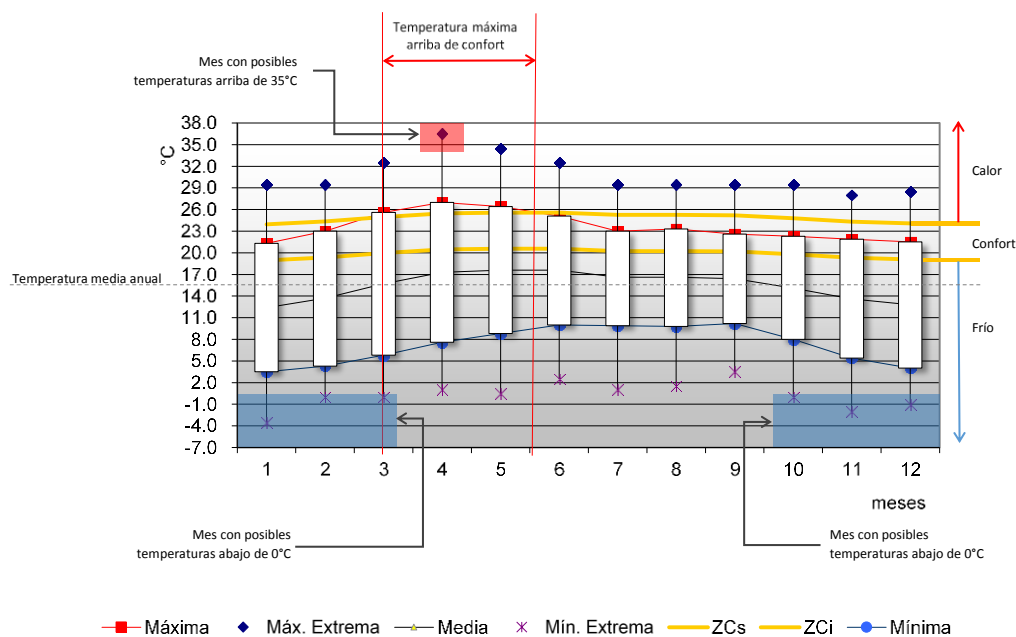


Figura14. Análisis de temperatura anual, oscilación térmica y rango de confort térmico. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Enero	8.0	6.4	5.2	4.3	3.7	3.5	4.0	5.6	7.9	10.9	13.9	16.8	19.2	20.8	21.3	21.1	20.5	19.6	18.4	16.9	15.2	13.3	11.5	9.7
Febrero	9.0	7.4	6.1	5.1	4.5	4.3	4.9	6.5	9.0	12.1	15.4	18.4	20.8	22.4	23.0	22.8	22.2	21.2	20.0	18.4	16.6	14.8	12.8	10.9
Marzo	10.8	9.1	7.7	6.7	6.0	5.8	6.4	8.1	10.7	14.0	17.4	20.6	23.3	25.0	25.6	25.4	24.7	23.7	22.3	20.7	18.8	16.7	14.7	12.6
Abril	12.5	10.8	9.5	8.4	7.8	7.6	8.2	9.9	12.4	15.6	19.0	22.1	24.7	26.4	27.0	26.8	26.2	25.1	23.8	22.2	20.3	18.3	16.3	14.3
Mayo	13.2	11.7	10.5	9.6	9.0	8.8	9.3	10.9	13.2	16.1	19.1	22.0	24.3	25.9	26.4	26.2	25.6	24.7	23.5	22.0	20.3	18.5	16.7	14.9
Junio	13.8	12.5	11.5	10.7	10.2	10.0	10.5	11.8	13.8	16.4	19.0	21.4	23.4	24.7	25.1	24.9	24.5	23.7	22.6	21.4	20.0	18.5	16.9	15.3
Julio	13.4	12.2	11.2	10.5	10.1	9.9	10.3	11.5	13.4	15.7	17.9	19.9	21.6	22.6	23.0	22.9	22.5	21.8	21.0	19.9	18.8	17.5	16.1	14.7
Agosto	13.2	12.1	11.1	10.4	10.0	9.8	10.2	11.4	13.2	15.5	17.8	20.0	21.8	22.9	23.3	23.2	22.7	22.0	21.1	20.0	18.7	17.4	16.0	14.6
Septiembre	13.3	12.3	11.4	10.7	10.3	10.2	10.6	11.6	13.3	15.3	17.5	19.5	21.1	22.2	22.6	22.5	22.1	21.4	20.5	19.5	18.3	17.0	15.8	14.5
Octubre	11.5	10.3	9.3	8.6	8.2	8.0	8.4	9.6	11.5	13.8	16.3	18.7	20.6	21.9	22.3	22.1	21.7	20.9	19.9	18.7	17.3	15.8	14.3	12.8
Noviembre	9.5	8.1	7.0	6.1	5.6	5.4	5.9	7.3	9.5	12.1	15.0	17.7	19.9	21.4	21.9	21.7	21.2	20.3	19.1	17.7	16.1	14.4	12.7	11.0
Diciembre	8.4	6.9	5.7	4.8	4.2	4.0	4.5	6.1	8.4	11.3	14.4	17.2	19.5	21.0	21.5	21.3	20.8	19.9	18.7	17.2	15.6	13.8	12.0	10.1
ANUAL	11.4	10.0	8.8	8.0	7.5	7.3	7.8	9.2	11.4	14.1	16.9	19.5	21.7	23.1	23.6	23.4	22.9	22.0	20.9	19.5	18.0	16.3	14.6	13.0

Figura 15. Temperaturas horarias en la ZMVC. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

Tomando como referencia **este el** rango de confort establecido previamente, se puede apreciar que sólo las tardes de marzo, abril y mayo superan ligeramente el límite de confort, las tardes de junio se encuentran en el límite superior de confort por lo que también pueden llegar a ser calurosas. En los demás meses, las tardes se encuentran dentro del rango de confort. La temperatura máxima extrema en el mes de abril es de 36.5 °C, y en mayo de 34.5 °C por lo que durante estos meses pueden llegar a presentarse temperaturas muy elevadas, en donde a ventilación natural empieza a dejar de ser una estrategia recomendable.

Todas las temperaturas medias y mínimas se encuentran por debajo del rango de confort, incluyendo al mes más caluroso, por lo que las mañanas son frías durante todo el año. Desde el mes de octubre hasta marzo, las temperaturas extremas inferiores son iguales o menores a 0 °C por lo que puede presentarse congelación del agua.

Aunque la oscilación anual es relativamente baja (5.2 °C), durante el día se presentan grandes oscilaciones de temperatura. La oscilación diaria promedio anual es de 16.3 °C; la mayor oscilación se presenta en marzo con 19.8 °C y la menor en septiembre con 12.4 °C. Figura14 y Figura 15.

5.3.2 Índice ombrotérmico:

Existen dos épocas marcadas en cuando al índice ombrotérmico. De noviembre a febrero, las temperaturas son bajas y hay un nivel bajo de precipitación por lo que el clima será frío y seco. Marzo y abril son meses cálidos y secos, mayo en menor medida debido a que empieza a aumentar la precipitación. Mayo y octubre son los meses de transición entre la época seca y la lluviosa ya que presentan niveles medios en temperatura y precipitación. La época de lluvia queda definida entre los meses de junio y septiembre. Figura16.

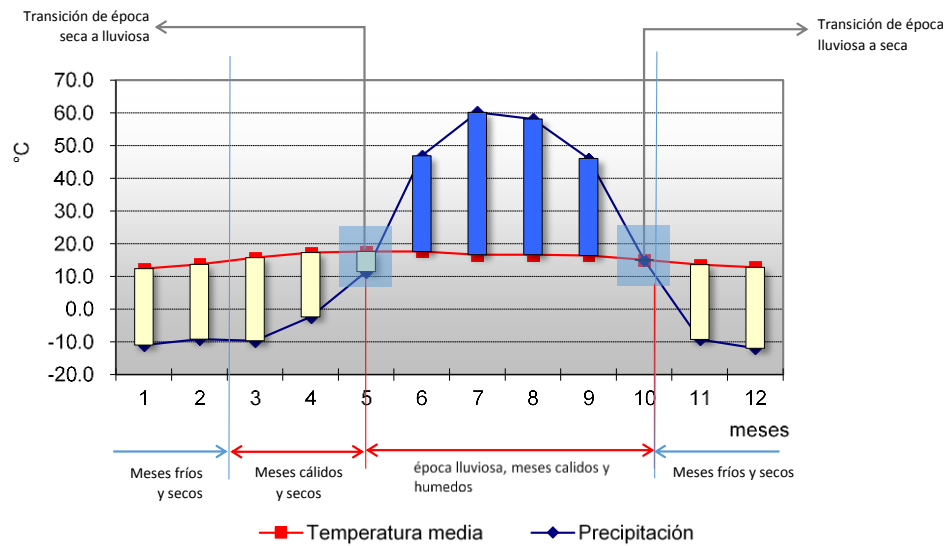


Figura 16. Análisis de índice ombrotérmico anual. Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

5.3.3 Radiación Solar.

La radiación difusa se encuentra todo el año entre 150 y 350 W/m², lo cual está muy por debajo de confort. Mientras que la radiación máxima total se encuentra dentro de confort durante la mayoría de los meses, exceptuando marzo y abril, donde supera el límite de confort. La radiación puede significar un recurso para propiciar las ganancias de calor. En marzo y abril, los límites de confort no son superados por un rango alto sin embargo, se debe considerar la protección solar. Figura 17.

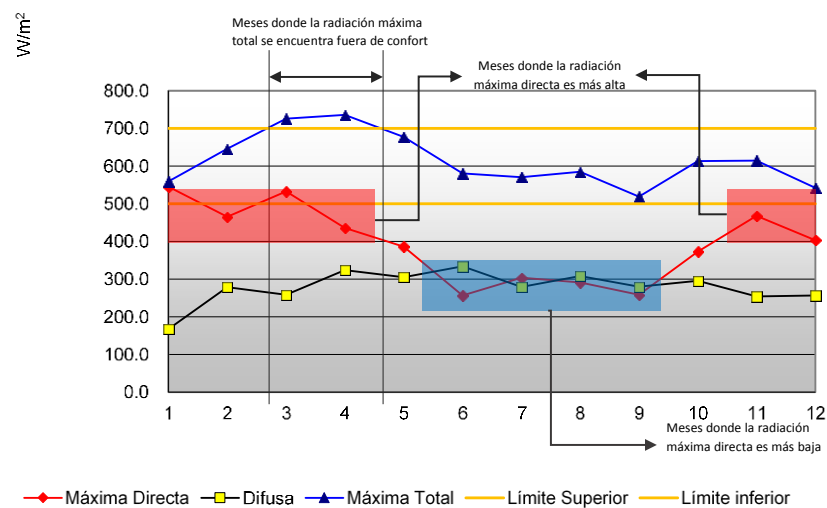


Figura 17. Análisis de radiación solar anual. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.1	195.0	336.6	454.5	532.1	559.2	532.1	454.5	336.6	195.0	54.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.2	253.3	407.7	534.4	617.2	645.9	617.2	534.4	407.7	253.3	94.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	143.3	315.7	478.5	610.3	695.7	725.3	695.7	610.3	478.5	315.7	143.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.1	183.6	351.0	505.4	628.8	708.3	735.7	708.3	628.8	505.4	351.0	183.6	30.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mayo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.1	194.8	343.4	478.3	585.3	653.8	677.4	653.8	585.3	478.3	343.4	194.8	53.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Junio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.1	176.3	301.4	414.5	503.9	561.0	580.6	561.0	503.9	414.5	301.4	176.3	55.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Julio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.3	165.6	290.2	403.3	493.0	550.4	570.1	550.4	493.0	403.3	290.2	165.6	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Agosto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	148.1	280.8	403.0	500.6	563.4	585.1	563.4	500.6	403.0	280.8	148.1	25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Septiembre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	104.9	227.8	343.6	437.2	497.8	518.8	497.8	437.2	343.6	227.8	104.9	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Octubre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.7	241.4	387.5	507.4	585.6	612.8	585.6	507.4	387.5	241.4	90.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Noviembre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.6	215.3	370.5	499.7	584.8	614.4	584.8	499.7	370.5	215.3	60.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Diciembre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.8	179.2	319.5	437.1	514.8	541.9	514.8	437.1	319.5	179.2	41.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	121.3	267.2	405.0	516.6	588.9	613.9	588.9	516.6	405.0	267.2	121.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 18. Radiación **total** diaria. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

La radiación máxima directa se encuentra la mayoría del año por debajo de los límites aceptable, con excepción de los meses de enero, y marzo, los cuales junto con febrero y noviembre son los meses que presentan mayor radiación directa. Abril y diciembre presentan una radiación directa arriba de 400 W/m², que anualmente también significa un valor alto. Los meses de junio a septiembre tienen la radiación directa más baja con 300 W/m² o menos. Se debe considerar la posible ganancia por radiación en los meses más fríos como una solución.

5.3.4 Asoleamiento

En base a la latitud del sitio de estudio (19°35' N) se realizó un análisis de asoleamiento para describir el movimiento del sol a lo largo del año, en la Figura19 se muestra la carta estereográfica para los dos semestres del año. Los indicadores cromáticos definen las condiciones térmicas horarias, se puede observar que los meses de marzo a junio tienen temperaturas de sobrecalentamiento durante la tarde mientras que las tardes del resto del año se encuentran en confort térmico; durante las mañanas todos los meses presentan temperaturas frías por debajo del confort.

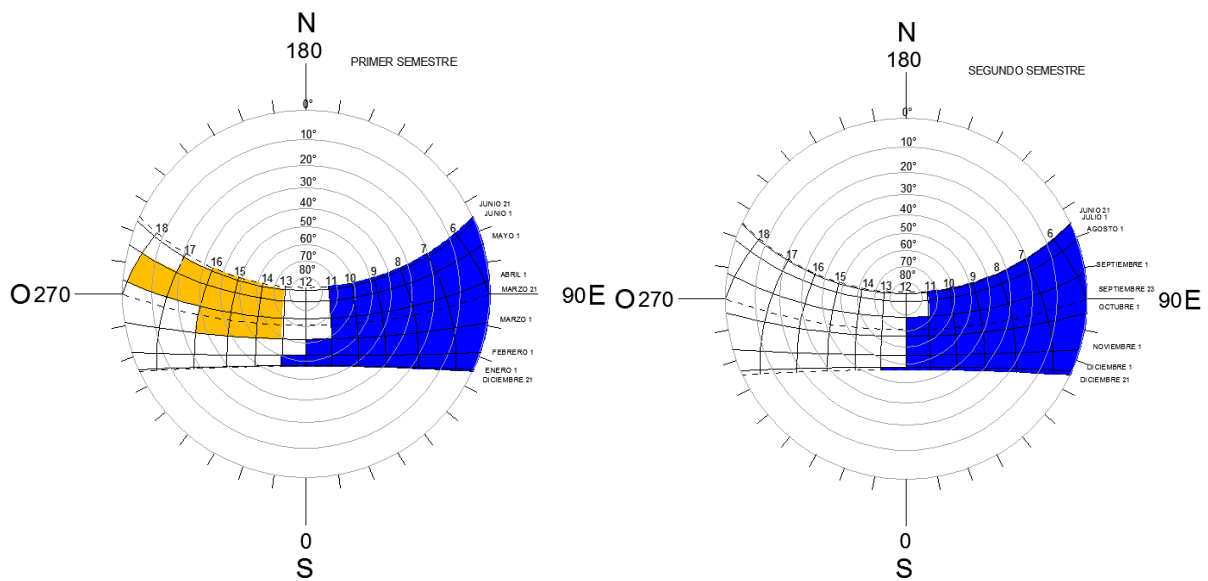


Figura19. Carta estereográfica del primer y segundo semestre latitud (19°35' N). Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Cálculos Para el Trazo de la Gráfica Solar (Fuentes, 2011)

5.4 Requerimientos bioclimáticos

A partir del análisis climático presentado en la sección anterior, es posible realizar conjeturas acerca de lo requerimientos bioclimáticos que se debe cumplir un edificio con el fin de buscar el confort térmico en la zona de estudio. Estos requerimientos están en función del clima por lo que es de esperarse que por las bajas temperaturas de la zona, por ejemplo, exista un requerimiento importante de ganancias de calor. Las altas temperaturas horarias por las tardes de primavera también sugieren un requerimiento de pérdidas de calor.

Dentro del capítulo se integran cuatro secciones referentes a los requerimientos bioclimáticos: los días grado DG, que es un indicador general de calentamiento o enfriamiento durante el año y puede ser comparado entre meses; el diagrama bioclimático de Olgyay donde se indican requerimientos más específicos de radiación, viento y humidificación; los triángulos de confort de Evans, donde se generan conclusiones generales sobre los requerimientos de ventilación, inercia térmica y ganancias internas o solares y por último el diagrama psicrométrico de Carrier extraído del programa *Climate Consultant* de donde se extrajeron también los requerimientos bioclimáticos y su porcentaje en horas para lograr el confort.

5.4.1 Diagrama Bioclimático.

Las temperaturas mensuales máximas y mínimas proyectan una clara necesidad de ganancias por radiación en la mañana, el máximo requerimiento es de 560 W/m² en el mes de enero y el mínimo es de

280 W/m² en septiembre. Durante las tardes, los meses de marzo, abril, mayo y junio presentan un requerimiento de humidificación que va desde 0.5g/kg hasta 1.5 g/kg y los meses de abril y mayo también presentan un requerimiento de ventilación con una velocidad de 0.25 m/s. Figura 20.

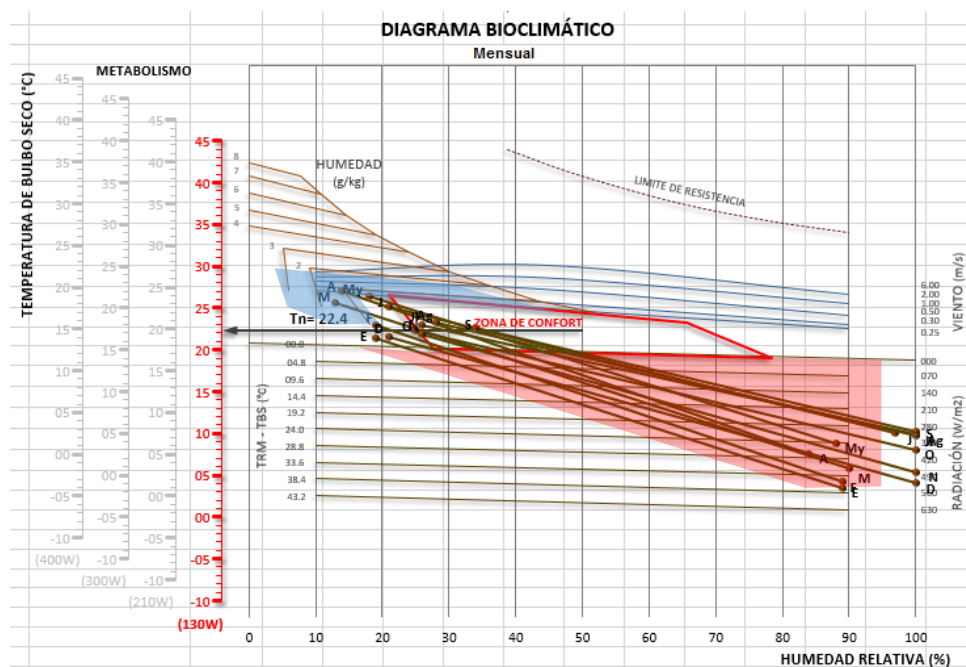


Figura 20. Diagrama Bioclimático para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Bioclimatic Analysis Data (Rincón & Fuentes, 2014)

5.4.1 Triángulos de Confort

No se tiene confort en ningún mes del año con una actividad sedentaria ni para dormir; los meses de junio, julio agosto y septiembre se encuentran al límite del confort para circulaciones al interior y dentro de confort para circulaciones al exterior. Los meses de mayo y octubre también se encuentran dentro de confort sólo para circulación al exterior.

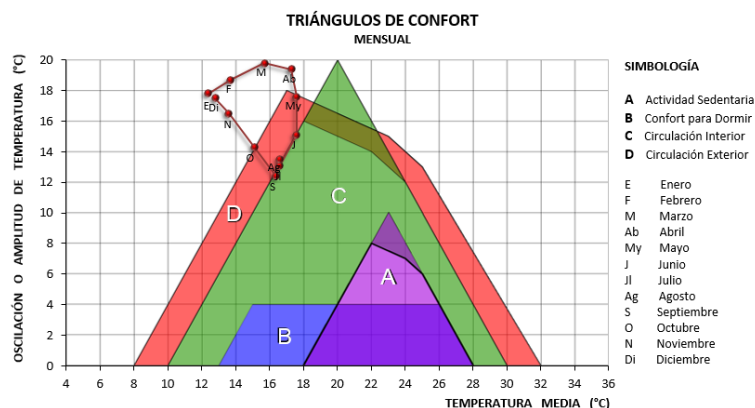


Figura 21. Triángulos de Confort de Evans para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Bioclimatic Analysis Data (Rincón & Fuentes, 2014)

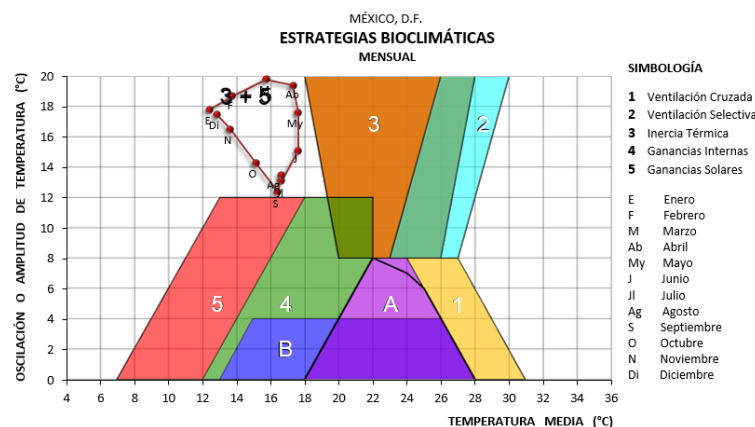


Figura 22. Estrategias bioclimáticas para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Bioclimatic Analysis Data (Rincón & Fuentes, 2014)

De acuerdo a las temperaturas medias, las estrategias bioclimáticas más pertinentes son la inercia térmica en abril mayo y junio y las ganancias solares en julio, agosto, septiembre y octubre. Los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre son los meses que se encuentran más fuera de confort por lo que además de la inercia térmica y las ganancias solares, son necesarias ganancias internas. Figura 21 y Figura 22.

5.4.1 Diagrama Psicométrico

En el análisis del clima realizado con el programa *Climate Consultant V. 5.5*, se definieron las necesidades bioclimáticas y los criterios de diseño para cada localidad considerando el modelo “ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model 2005. Figura 23.

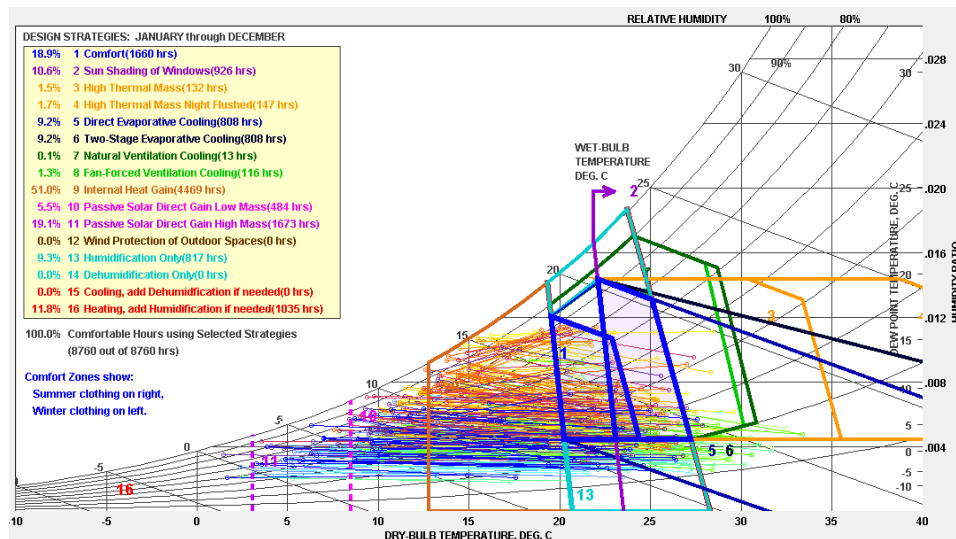
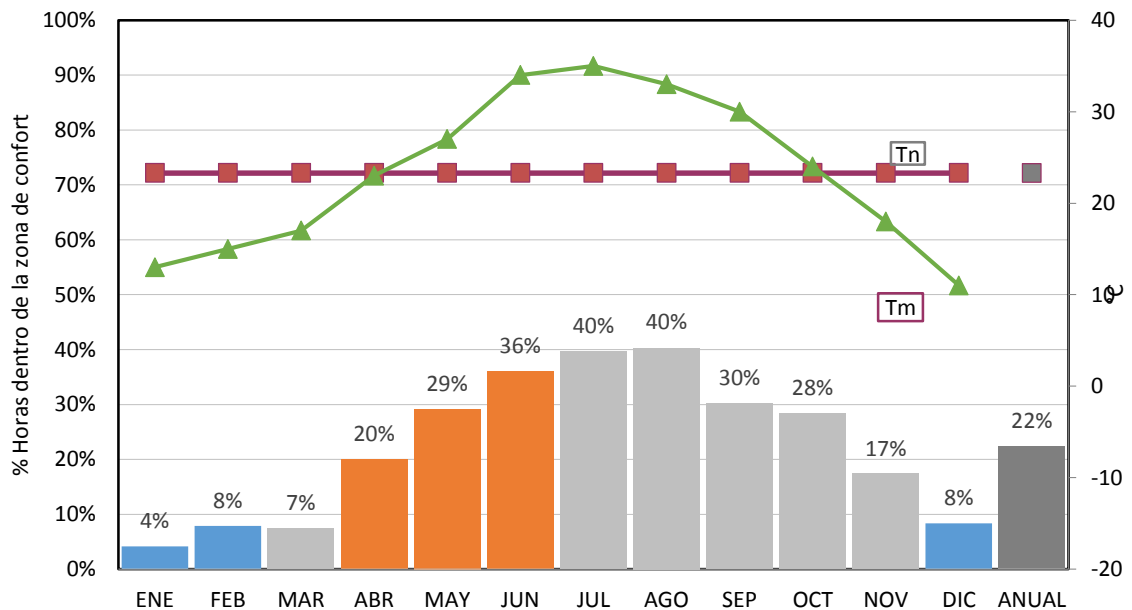


Figura 23. Diagrama Psicométrico para las temperaturas de NZMCM. Fuente: Elaboración propia en base Al Software *Climat Consultant*.



Gráfica 4. Porcentaje de horas dentro del rango de confort térmico mensual y anual. Elaboración propia en base al *Reporte 2.a del Proyecto Pautas para el Confort Ambiental y el Desempeño Energético de la Vivienda Urbana de la Red Arquitectura Bioclimática*

Anualmente, El 22.40 % de las horas se encuentran dentro de confort y existen requerimientos de calentamiento y enfriamiento para resto del tiempo. Si se comparan los porcentajes de horas en confort con

las temperaturas medias mensuales, se puede apreciar que el confort no siempre se encuentra directamente relacionado con la temperatura media mensual.

De acuerdo al análisis de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el clima está dividido en cuatro temporadas a lo largo del año: 1) Temporada fría (invernal) que corresponde a los meses de diciembre a marzo con 6.94% del tiempo en condiciones de confort, 2) Temporada intermedia (Primavera) de abril a mayo con 24.58 %, 4) Temporada cálida (Verano) que va de junio a agosto con 45.82% y 4) Temporada intermedia (Otoño) que abarca de septiembre a noviembre con el 25.29% del tiempo en condiciones de confort.

Las técnicas de control climático de acuerdo a los requerimientos descritos anteriormente se resumen en la Tabla 5. Para la temporada fría, los criterios se enfocan en favorecer el calentamiento interior promoviendo las ganancias solares por radiación y disminuir las pérdidas de calor por conducción e infiltraciones. Para la temporada cálida, los criterios se enfocan en minimizar las cargas térmicas exteriores evitando las ganancias por conducción y por radiación y favorecer las pérdidas de calor al promover la ventilación y el enfriamiento evaporativo.

5.4.2 Días Grado

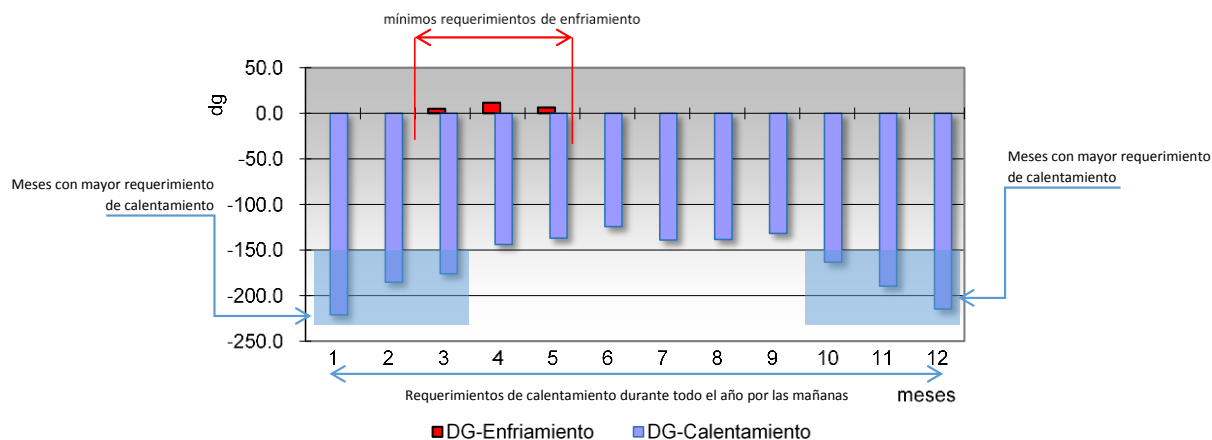


Figura24. Análisis de días grado anual. Fuente: Elaboración propia en base a la Hoja de Cálculo Datos Climáticos (Fuentes, 2011)

Todos los meses presentan un requerimiento de calentamiento por las mañanas, los casos más extremos son los meses que comprenden el periodo invernal; marzo, octubre y noviembre también presentan requerimientos de calentamiento superiores a 150 DG; mientras que los requerimientos para los demás

meses fluctúan entre los 100 y 150 DG. Los requerimientos de enfriamiento son muy bajos (menos de 15 DG) y están presentes sólo durante marzo, abril y mayo que son los meses más calurosos. Figura24.

5.4.3 Resumen de Estrategias de Control de acuerdo a los Requerimientos Bioclimáticos.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los requerimientos de acuerdo al análisis del clima del NZMCM y las estrategias generales que pueden ser aplicadas en base al mismo análisis. La información se muestra de acuerdo a la temporada fría y cálida y conforme a las técnicas de control climático a partir del tipo de transferencia del calor.

Tabla 5.
Estrategias de Control Climático

Temporada	Criterio	Técnicas de control climático			
		Conducción	Convección	Radiación	Evaporación
Temporada fría	Favorecer calentamiento interior			Promover ganancias solares por radiación	
	Disminuir pérdidas de calor	Minimizar flujos de calor por conducción	Minimizar infiltraciones		
Temporada cálida	Minimizar cargas térmicas exteriores	Minimizar flujos de calor por conducción		Minimizar ganancias solares por radiación	
	Favorecer pérdidas de calor		Promover la ventilación		Promover el enfriamiento evaporativo

Nota: Fuente: Elaboración propia en base a Climatic Building Design (Watson & Labs, 1992).

5.5 Monitoreo de vivienda en sitio.

En el estudio *Análisis Térmico Comparativo por Medio de Simulación Numérica de Tres Viviendas de Interés Social en Tres Diferentes Climas de La República Mexicana* (Figueroa, et al., 2013) se evaluaron los niveles de confort que se tienen en viviendas de diferentes estados de la república con el fin de calcular el desempeño térmico en su interior.

En la investigación se realizó un trabajo de monitoreo de la vivienda en el que se instalaron 15 sensores calibrados en la vivienda tipo *Data Loggers* marca Lascar, los cuales fueron tanto superficiales como de temperatura de bulbo seco y humedad y su instalación fue en diferentes puntos de la vivienda tanto en planta baja como en planta alta y en superficies exteriores e interiores. Los datos extraídos de los sensores corresponden a los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2012. (Figueroa, et al., 2013)

5.6 Características arquitectónicas de la vivienda y generación modelo de simulación:

La vivienda tiene una orientación noroeste con medidas perimetrales de 10.88m en los costados y 3.45m en fachadas principal y posterior; las fachadas laterales colindan con viviendas semejantes ya que se trata de un conjunto habitacional. Cuenta con dos niveles, el primer nivel tiene 28.19m² y el segundo nivel 32.35m² sumando un total de 67.05m² construidos. Figura25y Figura26.

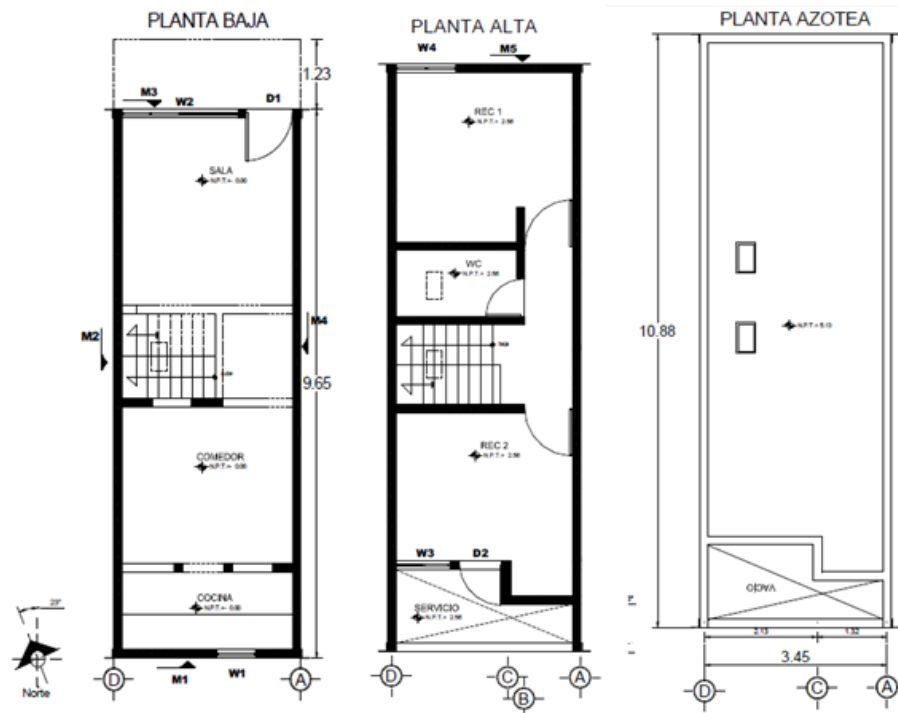


Figura25. Vivienda Monitoreada, Modelo de Simulación Casa en el Norte de la ZMVM. Fuente: Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climas de México (Valerdi, 2011)

Dentro del mismo proyecto de investigación del monitoreo, se realizaron además, modelos de simulación en el software *DesignBuilder*® 3.0 para analizar el desempeño térmico y el consumo energético de las viviendas concluyendo que en la Ciudad de México no existe un requerimiento importante de enfriamiento aún en los meses más cálidos, pero que las condiciones durante el invierno se encuentran por debajo del confort (Figuroa, et al., 2013)

Los datos del clima para la simulación se obtuvieron a partir de la interpolación de normales climatológicas, estaciones meteorológicas automatizadas en sitio e información satelital adquirida del Software *Meteonorm* 6.1®. La Figura27muestra el modelo de simulación generado en la investigación de acuerdo a las características específicas de la vivienda monitoreada.

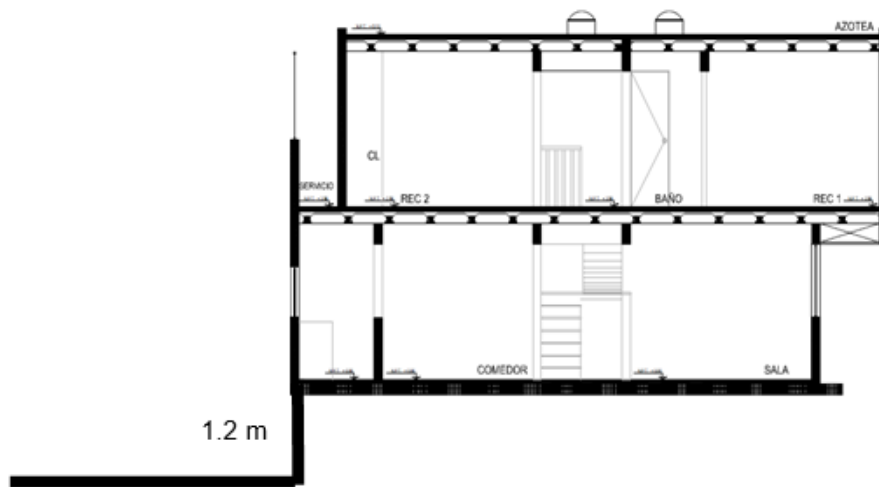


Figura 26. Sección Longitudinal de Vivienda Monitoreada. Fuente: Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climas de México (Valerdi, 2011)

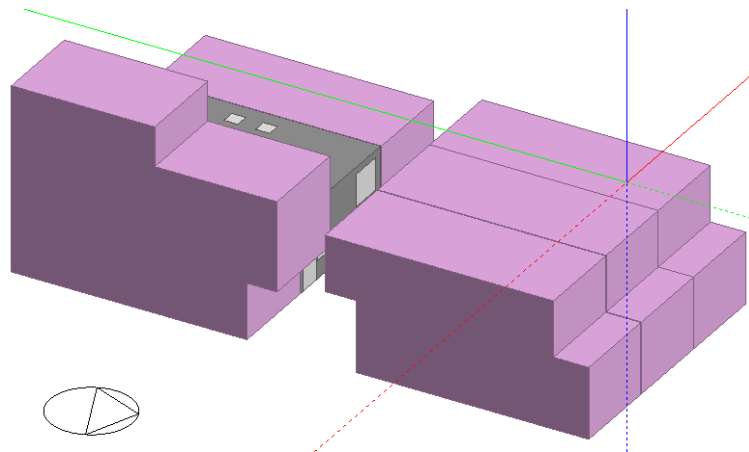


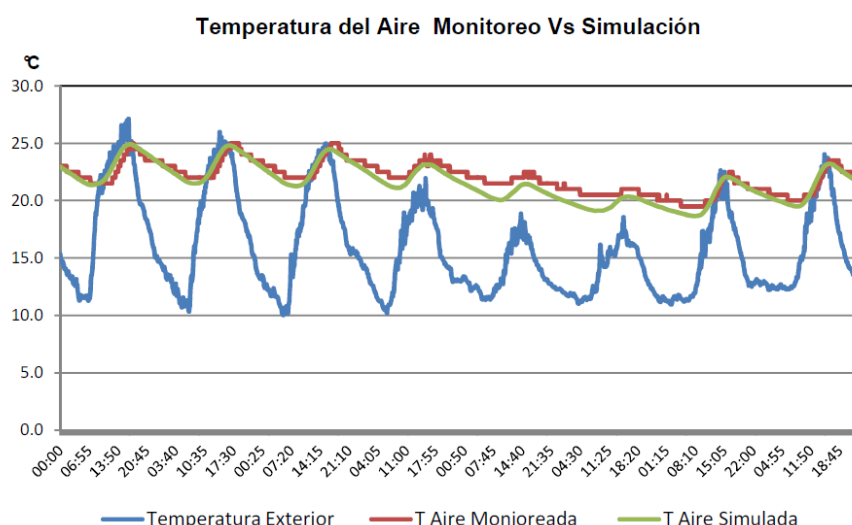
Figura 27. Modelo simulación de Software *DesignBuilder* de la vivienda monitoreada. Fuente: Modelo de Simulación Casa en el NZMVM, (Valerdi, 2011)

5.7 Calibración y validación del modelo de simulación:

La practicidad de las simulaciones numéricas para calcular las condiciones térmicas en un edificio resulta cada vez más conveniente para sustentar la toma de decisiones, prevenir errores y lograr ahorros energéticos o mejoras en la calidad del ambiente interior, sin embargo, los Software disponibles como cualquier herramienta de cálculo, son sistemas que procesan una información recibida por lo que si dicha información es incorrecta, invariablemente la información procesada y los resultados obtenidos también

serán erróneos por lo que es necesario una calibración que garantice la asertividad los datos de entrada para que la información generada por el cálculo sea confiable.

En el mismo trabajo de investigación *Análisis Térmico Comparativo por Medio de Simulación Numérica de Tres Viviendas de Interés Social en Tres Diferentes Climas de La República Mexicana*, se compararon datos monitoreados contra simulados para estimar la validez del modelo. En la Gráfica 5 se muestra la comparación de los datos, se puede observar que no hay una alta variación entre una fuente de datos y otra sin embargo esta evaluación es cualitativa y no hay datos que muestren el margen de error.



Gráfica 5. Temperatura monitoreada y simulada al interior de la vivienda. Fuente: Resultados Cualitativos y Cuantitativos Casa en el NZMVM (Valerdi, 2011)

Se realizó también una evaluación cuantitativa en base al Factor de Decremento, Tiempo de Retardo y Temperatura interior media de resultados de simulación y monitoreo Ver Tabla 6. En la tabla no se validan los resultados con una referencia que apruebe los valores obtenidos.

Tabla 6.

Análisis Cuantitativo de Resultados, Resultados Cualitativos y Cuantitativos Casa en la ZNMVCM.

Mes	Df ± dDf		Tr ± dTr		T ± dT	
	Monitoreo	Simulación	Monitoreo	Simulación	Monitoreo	Simulación
Cálido	0.225	0.251	1.226	1.801	21.400	20.700
	± 0.050	± 0.040	± 1.009	± 0.803	± 1.080	± 1.040
Frío	0.236	0.275	1.548	1.610	20.460	19.750
	± 0.032	± 0.040	± 1.486	± 0.843	± 0.064	± 0.590

Nota: Fuente: Elaboración propia en base a *Resultados Cualitativos y Cuantitativos Casa en el Norte de la ZMVM* (Valerdi, 2011)

Para poder usar el modelo de simulación como herramienta de trabajo, éste debe ser calibrado a partir de un criterio estandarizado que establezca un rango de error válido. A continuación se presenta la metodología para lograr la calibración del modelo considerando los estándares de *ASHRAE Guideline 14* y los resultados obtenidos después del proceso de calibración.

La metodología aplicada en este documento está basada en el artículo: *Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data (Raftery, Keane, & Costa, 2011)* donde se siguen los lineamientos de *ASHRAE Guideline 14* considerando los datos monitoreados y simulados para calcular un rango de error. Dicha metodología se presenta a continuación.

5.7.1 Datos de calibración

Para la calibración de este modelo, se usaron datos horarios de temperatura de bulbo seco y humedad de la recámara sur, correspondiente a sensor *TH 8* (Valerdi, 2011) la vivienda se encontraba desocupada, con las ventanas cerradas y sin aparatos conectados por lo que las características del modelo fueron las mismas. La infiltración se modificó de 0.1 ca/h con estanqueidad buena, debido a que se trata de una vivienda nueva, sin embargo, los valores finales fueron de 0.7 ca/h para cumplir con los valores establecidos por *ASHRAE* de acuerdo al apartado de ventilación e infiltración (*ASHRAE*, 2010).

5.7.2 Documentación

ASHRAE Guideline 14 establece valores mínimos aceptables para la Tendencia Media de Error *MBE* de $\pm 10\%$ y para la Variación Acumulada de la Raíz Media de Error al Cuadrado *CVRMSE* de $\leq 30\%$, ambos valores se calculan en base a los datos monitoreados y simulados de un edificio. Las ecuaciones usadas son:

$$\overline{M_p} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} M_i}{N_p}$$

$$CVRMSE_{(p)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} ((M_i - S_i)^2 / N_p)}}{\overline{M_p}}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} M_i}$$

Dónde: M son los datos monitoreados, S son los datos simulados, p es el intervalo de medición (ej. Mensual, semanal, diario y horario) N_p es el número de datos en el intervalo (mes=12; día=365 y horario=8760) y M_p es el promedio de datos monitoreados, 1512 referentes a los meses monitoreados.

El porcentaje de error absoluto también fue calculado para tener una referencia más siguiendo la metodología base (Raftery, et al., 2011) como se muestra en la siguiente ecuación. Éste valor no está limitado por los estándares de *ASHRAE* pero permite tener una noción más certera de la diferencia que existe entre los valores simulados y los monitoreados.

$$\text{porcentaje de error absoluto} = \sqrt{\left(\frac{M_i - S_i}{M_i}\right)^2}$$

5.7.3 Cerramientos/Envolvente

Las propiedades térmicas de los materiales usados en el modelo fueron revisadas con respecto a los registrados en el reporte *Modelo de Simulación Casa en el norte de la ZMVM* (Valerdi, 2011). Ver Tabla 7. Los valores de las propiedades que presentaban alguna variación fueron modificadas de acuerdo a los valores del reporte.

Tabla 7.

Propiedades térmicas de los materiales aplicados en el modelo de simulación.

Material	Conductividad (W/mK)	Calor Específico (J/kgK)	Densidad (kg/m ³)	Emisividad	Absortancia
Block hueco	0.24	1000	760	0.90	0.80
Revoque	1.00	1000	1800	0.90	0.60
Concreto	2.00	1000	2400	0.90	0.60
Vidrio	0.90	750	2500	0.84	0.30
Aluminio	230.00	880	2800	0.30	0.30
Aire	0.30	1000	1000	0.70	0.70
Loseta Vinílica	0.19	1470	1200	0.90	0.60
Casetón	0.46	1400	10	0.90	0.80
Impermeabilizante A.	0.15	1000	2100	0.90	0.80
Pasta texturizada	0.80	1000	1690	0.90	0.60

Nota: Fuente: Elaboración propia en base a *Modelo de Simulación Casa en el NZMVM*, (Figuerola et al).

Los valores que tuvieron mayor repercusión fueron la emisividad y la absortancia cuando se trató de elementos superficiales exteriores. Los valores de calor específico, densidad y conductividad también tuvieron efectos de variación en los resultados aunque en menor proporción. En la Tabla 10, se muestra la jerarquización de los efectos de cada partida en los resultados calculados para *MBE* y *CVRMSE*.

La vivienda tiene un sistema constructivo común en México, los muros son de block hueco con castillos de concreto armado y las losas son de casetón de poliestireno con viguetas prefabricadas de

concreto armado, tanto muros como losas presentan puentes térmicos en los elementos estructurales que no estaban reflejados en el modelo original.

El efecto de los puentes térmicos en los elementos constructivos provoca cambios en el desempeño general de cada sistema por lo que las pérdidas y ganancias térmicas generadas por estos elementos debe ser registrada así como su efecto en las condiciones interiores.

5.7.4 Cargas internas

La vivienda estudiada en este documento se monitoreó y simuló desocupada, las ventanas y puertas de la casa se mantuvieron cerradas durante el monitoreo y no hubieron aparatos eléctricos conectados, por lo que prácticamente no hubo ganancias internas generadas por el uso del espacio.

El modelo se simuló bajo las mismas condiciones, sin embargo, para la calibración de modelos de simulación de espacios ventilados naturalmente y de aquellos que usen sistema de calefacción o aire acondicionado es importante considerar encuestas a los usuarios para obtener un horario lo más detallado posible que permita conocer las ganancias internas obtenidas por la ocupación del espacio. En el caso de que el estudio se enfoque a consumo energético, los medidores y recibos de luz son una herramienta principal para el proceso de calibración.

5.7.5 Identificación de errores.

Dentro del proceso de calibración, se pueden presentar errores en el modelo que afecten el cálculo de resultados así que es importante revisar la simulación en cada revisión para identificar y reparar los errores presentados, por ejemplo, la condición del terreno expuesto 1.2m en la fachada posterior no estaba reflejada en el modelo original, tampoco había un elemento de terreno así que ambos elementos fueron modelados. Figura. 28.

Las condiciones de la casa son típicas de una vivienda social; las fachadas con mayor superficie colindan con viviendas a los lados que tienen características arquitectónicas prácticamente iguales. Como se mencionó anteriormente, la vivienda monitoreada se encontraba desocupada, por lo que las viviendas colindantes presentaban el mismo balance térmico en el caso de que también se encontrara desocupada, o un balance térmico con ganancias mayores en el caso de ser una vivienda ocupada, en este caso la vivienda simulada presentaría ganancias térmicas por convección por lo que para fines prácticos de calibración los muros colindantes se programaron como adiabáticos, es decir, la vivienda no presentara pérdidas ni ganancias térmicas a través de estas superficies pero los elementos si repercuten a las ganancias solares por radiación debido a la sombra proyectada en la envolvente.

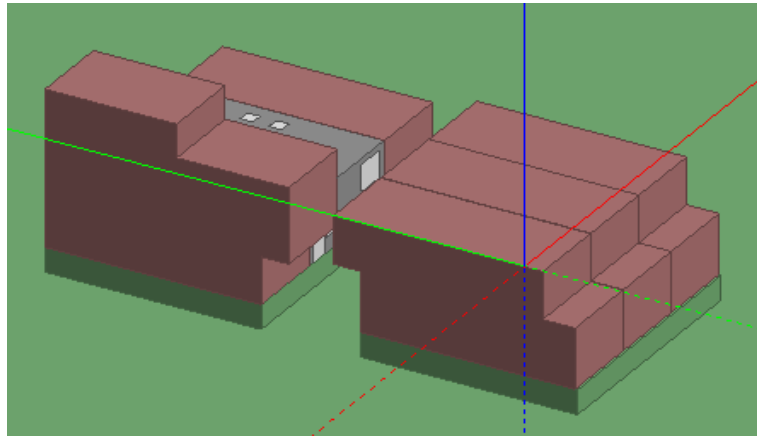


Figura. 28. Modelo de simulación después de realizar las modificaciones del sitio. Fuente: Elaboración propia en base al Software *DesignBuilder*

5.7.6 Repetición del proceso

De acuerdo a la metodología propuesta por Raftery, la repetición del proceso es necesaria para identificar discrepancias aun cuando los valores para *MBE* y *CVRMSE* sean aceptables. En el caso de la calibración de la vivienda, los valores aceptables fueron alcanzados desde la revisión *R15* (

Tabla 9), sin embargo, hubo más observaciones que implicaron más modificaciones para mejorar el modelo.

Para la repetición del proceso, Raftery sugiere identificar discrepancias, como primer paso para revisar errores propios del modelo, en este caso, se deberán hacer las modificaciones necesarias y actualizar el modelo, en la revisión *R14* se añadió una capa de terreno y en la revisión *R16* se modeló el terreno expuesto bajo la vivienda. Si no existen errores en el modelo, se deben aclarar discrepancias en los datos de entrada, en este caso, las temperaturas de terreno no coincidían con la información del clima pero ese cambio se realizó en el proceso inicial de la calibración, los puentes térmicos y la revisión de las propiedades térmicas de los materiales fueron modificaciones que se realizaron durante este proceso (*R15*, *R18*, *R20*) la propiedad adiabática de las fachadas colindantes fue información de entrada que también se modificó durante esta etapa.

Sí después de aclarar las discrepancias de información encontradas, los estándares mínimos no se cumplen, se debe obtener nueva información de entrada y actualizar el modelo. Para la calibración de la vivienda no fue necesario ya que se lograron los parámetros establecidos con la información previa. La Tabla 8 muestra el proceso de calibración, la primera columna indica el número de revisión, la segunda

columna indica la partida en la que se hizo la modificación y la tercera columna muestra una breve descripción de la modificación hecha.

La

Tabla 9 muestra los valores de error calculados; la primera columna indica la revisión, las columnas *MBE/BS* y *MBE/HR* indican los valores calculados para MBE de bulbo seco y humedad respectivamente. De la misma forma, las columnas *CVMSR/BS* y *CVMSR/HR* indican los valores calculados para *CVMSR* de bulbo seco y humedad y *APE/BS* y *APE/HR* indican los valores calculados del *APE* o porcentaje de error absoluto de bulbo seco y humedad relativa.

Tabla 8.

Modificaciones hechas en el proceso de calibración del modelo base.

Rev.	Partida	Descripción
R 1		Modelo Original
R 2	Sitio	Temperatura de terreno
R 3	Sitio	Capa de terreno en suelo sobre terreno/ block en 1 capa
R 4	Materiales	Propiedades térmicas de block hueco
R 5	Materiales	Puentes térmicos en muros y losas
R 6	Materiales	Propiedades térmicas de casetón
R 7	Opciones	Transferencia Superficial de Calor, <i>interior</i> y <i>exterior</i>
R 8	Materiales	Emisividad y Absortancia de block hueco
R 9	Materiales	Emisividad y Absortancia de impermeabilizante
R 10	Materiales	Emisividad y Absortancia de casetón
R 11	Materiales	Propiedades térmicas de revoque
R 12	Materiales	Propiedades térmicas de concreto
R 14	Sitio	Añadir capa de terreno
R 13	Ventilación	Estanqueidad buena
R 15	Aberturas	Acristalamiento simple, marcos de aluminio
R 16	Sitio	Condicionante de 1.2m de terreno expuesto
R 17	Sitio	Colindancias adiabáticas
R 18	Materiales	Block en 3 capas
R 19	Ventilación	0.7 ca/h buena
R 20	Materiales	Puentes térmicos 20 muros, 35 cubierta

Nota: Fuente. Elaboración propia.

Tabla 9.

Análisis de error de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa por revisión.

Rev.	MBE / BS	MBE / HR	CVMSR / BS	CVMSR / HR	APE/ BS	APE/ HR
R 0	-1%	-5%	18%	6%	71%	20%
R 1	5%	15%	25%	15%	67%	28%
R 2	5%	15%	25%	15%	67%	28%

R 3	0%	19%	27%	20%	67%	36%
R 4	-2%	19%	28%	20%	66%	38%
R 5	-1%	18%	33%	22%	72%	48%
R 6	3%	15%	34%	21%	74%	49%
R 7	9%	10%	34%	19%	76%	45%
R 8	17%	6%	29%	10%	70%	30%
R 9	17%	7%	27%	9%	69%	27%
R 10	23%	-4%	39%	22%	83%	57%
R 11	32%	-9%	36%	11%	76%	24%
R 12	32%	-9%	36%	12%	72%	25%
R 13	12%	-9%	24%	12%	63%	29%
R 14	11%	7%	20%	9%	50%	28%
R 15	5%	6%	13%	8%	30%	28%
R 16	-3%	20%	19%	20%	43%	33%
R 17	16%	5%	21%	6%	55%	12%
R 18	14%	5%	18%	6%	47%	11%
R 19	7%	5%	12%	7%	35%	18%
R 20	7%	5%	13%	7%	36%	17%

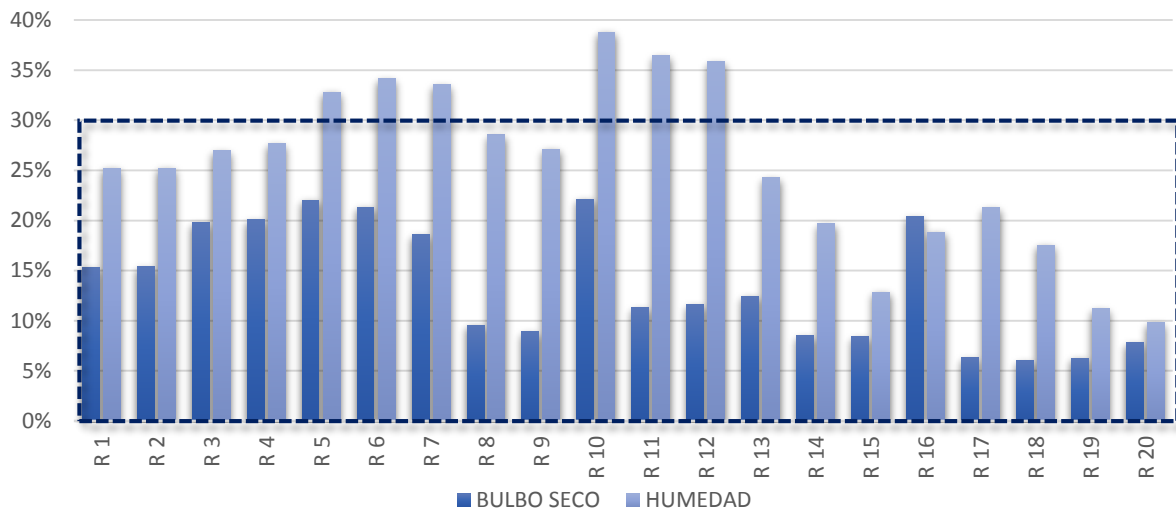
Nota: Fuente. Elaboración propia.

Se puede observar que los valores calculados son aceptables en la revisión *R0*, es decir, en el modelo original, sin embargo, presenta discrepancias en los datos de entrada. En la Revisión *R15*, también se logran los valores aceptados pero siguiendo la metodología descrita de *repetición del proceso*, se encontraron más observaciones en el modelo y en la información de entrada al Programa.

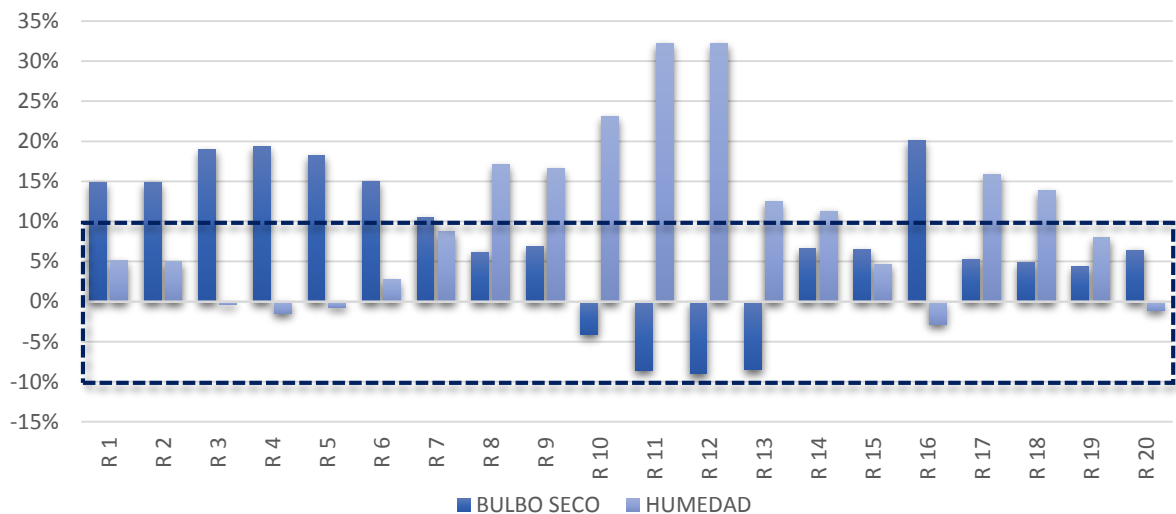
En la Gráfica 7 y Gráfica 6 muestran los valores de la

Tabla 9 para *MBE* y *CVRMSE* respectivamente. Cada barra corresponde a una revisión para bulbo seco y para humedad por lo que en ambas graficas se puede observar el proceso de calibración y e identificar las revisiones que tuvieron más repercusiones en los valores de error calculados. Las líneas punteadas indican los límites de error establecidos por *ASHRAE* para cada caso.

De la revisión *R12* a la *R13*, el valor de *MBE* se reduce en más del 10% y el *CVRMSE* disminuye más de un 5%, lo que indica una vulnerabilidad alta tanto de la temperatura como de humedad por los valores de infiltración. Del mismo modo, modelar las condicionantes reales del terreno tuvo una influencia alta en los valores de error calculados, así como la programación adiabática de los muros colindantes; este cambio se realizó partiendo de la condición real de la vivienda, donde las casas colindantes presentarán un balance térmico igual (en el caso de que se encuentren desocupadas) o con mayores ganancias, dependiendo del usuario.



Gráfica 6. CVMSE Calculado para bulbo seco y humedad en revisiones. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 7. MBE Calculado para bulbo seco y humedad en revisiones. Fuente: Elaboración propia

La relación de la jerarquía de cada partida de acuerdo al efecto obtenido en los valores calculados para *MBE* y *CVMSE* se muestra en la Tabla. Las modificaciones a las características del sitio fueron las que tuvieron mayor influencia; las modificaciones en los materiales fueron las más presentes en cantidad, aunque el valor del efecto en el cálculo fue menor que las modificaciones al sitio; las opciones propias del programa definirán características de cálculo que son determinantes en los resultados obtenidos; los valores de infiltración y estanqueidad afectarán el drásticamente el desempeño tanto de temperatura como de humedad. Es importante recalcar que las condiciones desocupadas de la vivienda representan un caso singular, por lo que la jerarquía de la calibración no incluye ganancias latentes.

Tabla 10.
Jerarquización de Partidas

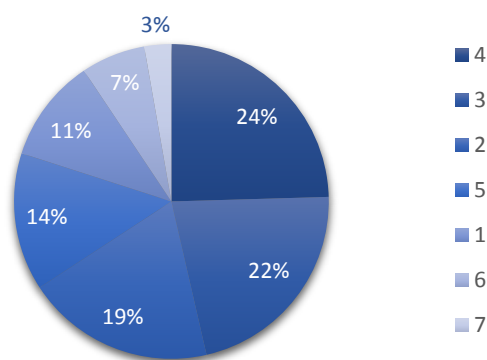
J	Partida	Descripción	Rev.
1	Sitio	Datos Climáticos, condiciones generales del sitio.	R13, R16
2	Materiales	Características termo físicas de los materiales de construcción.	R6, R8, R10,
3	Opciones	Configuración de las opciones del Software.	R7
4	Ventilación	Valores de infiltración /estanqueidad del espacio	R15, R19

Nota: Elaboración propia.

5.8 Recopilación estadística del NZMVM.

5.8.1 Usuario:

De acuerdo a la publicación *Conjunto de datos: Viviendas y sus ocupantes según características de las viviendas* (INEGI, 2012), el número de integrantes por vivienda en la ZMVM varía de 1 a 7 o más; las viviendas con 6 y 7 integrantes representan menos del 10% del total por lo que no se incluyen en las variables del estudio. Se toman como casos extremos las viviendas con 1 y 5 integrantes y la tercera variable con 3 integrantes para incluir los rangos intermedios. Gráfica. Para la simulación se considera la densidad de cada espacio por tipo de usuario con la configuración de 24 horas los 365 días del año basado en la *Encuesta de Uso de Tiempo* del GDF (INEGI, 2011) donde se especifican las actividades diarias dentro de la vivienda y la duración. Ver Anexo.



Gráfica 8. Número de integrantes por vivienda en la ZMVM.

5.8.2 Material de Muro:

Para la selección de materiales de construcción se usaron los datos generados en el estudio *Sistemas Constructivos de Muros y Techos de la Envolvente Utilizados en la Zona Norte de la Ciudad de México* (Figueroa, et al., 2013) donde se realizó el estudio de 25 modelos de viviendas, que representan el 27% de

las viviendas ofertadas en la zona, en las observaciones del estudio se menciona que “En la mayoría de los casos, ésta (el prototipo de vivienda) constituía una etapa de un desarrollo mucho más grande, llegando algunos planes maestros a incluir en un solo desarrollo desde 20,000 hasta 40,000 viviendas similares a las analizadas”. En el estudio se generaron fichas técnicas con el registro de las características arquitectónicas de las viviendas y los materiales constructivos. Para esta investigación, se recopiló la información técnica de los materiales de muros (Ver Tabla 11) y éstos fueron evaluados térmicamente en el modelo de simulación validado para llegar a una selección de las tres opciones que representan una diferencia de más de 1°C anual en el interior de la vivienda. Los materiales seleccionados fueron muro de Block de 10 cm utilizado en la casa muestra; muro de block de 13 cm y muro de concreto armado de 12 cm.

Tabla 11

Propiedades térmicas de materiales para los sistemas de muros del Universo de Estudio.

Descripción	Id	No	Material	Puente Térmico	%	Conductividad	Calor Espec.	Densidad
Block hueco de 10 cm	M1	1	Mortero			1.00	1000	1800
		2	Block	Concreto Ref.	30	0.24	1000	760
						2.00	1000	2400
		3	Aire	Concreto Ref.	30	0.30	1000	1000
						2.00	1000	2400
		4	Block	Concreto Ref.	30	1.00	1000	2400
		5	Mortero			2.00	1000	1800
Block hueco de 13 cm	M2					0.24	1000	760
		1	Block	Concreto Ref.	30	2.00	1000	2400
						0.30	1000	1000
		2	Aire	Concreto Ref.	30	2.00	1000	2400
		3	Block	Concreto Ref.	30	2.00	1000	2400
		4	Recubrimiento			1.00	1000	1800
		5	Yeso			0.80	1000	169
Concreto armado 12 cm	M3	1	Mortero			1.00	1000	1800
		2	Concreto Ref.			1.00	1000	2400
		3	Mortero			1.00	1000	1800

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a *Sistemas Constructivos de Muros y Techos de la Envolvente Utilizados en la Zona Norte de la Ciudad de México* (Figueroa, et al., 2013).

5.8.3 Material de Losa:

La selección tuvo el mismo procedimiento que la del material de muro pero en este caso no se descartó ninguna variable debido a las características térmicas de cada sistema (Ver Tabla 12). Los sistemas fueron concreto armado con loseta vidriada, concreto armado con impermeabilizante elastomérico y vigueta y bovedilla de poliestireno.

Tabla 12

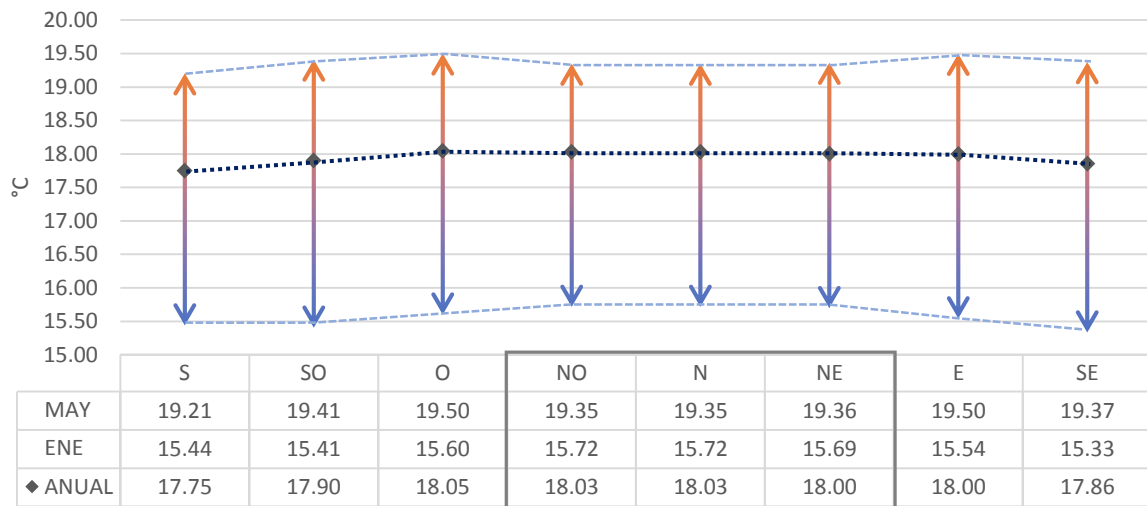
Propiedades térmicas de materiales para los sistemas de muros del Universo de Estudio.

Descripción	Id	No	Material	Puente Térmico	%	Conductiv.	Calor Específico	Densidad
Concreto armado con impermeabil.	L1	1	Impermeabilizante			0.15	1000	2100
		2	Concreto Ref. para losa			1.40	840	2100
		3	Plafón de yeso pulido			0.38	840	1120
Concreto armado con loseta vinílica	L2	1	Loseta vinílica			1.4	840	2500
		2	Pegazulejo			1.00	1000	1800
		3	Concreto Ref. para losa			1.40	840	2100
		4	Enlucido de yeso pulido			0.21	1340	720
Vigueta y bovedilla	L3	1	Impermeabilizante			0.15	1000	2100
		2	Concreto Ref.			2.00	1000	2400
		3	Casetón			0.46	1400	10
		4	Yeso	Concreto Ref.	35	2.00	1000	2400
						0.80	1000	169

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a *Sistemas Constructivos de Muros y Techos de la Envolvente Utilizados en la Zona Norte de la Ciudad de México* (Figuerola, et al., 2013).

5.8.4 Orientación:

Por último se realizaron pruebas de simulación en el modelo calibrado para evaluar las condiciones térmicas al interior de la vivienda de la vivienda en ocho orientaciones (*N, NE, E, SE, S, SO, O, NO*). En base a los resultados obtenidos en el mes más frío (enero), más cálido (mayo) y anual, se descartaron las variantes *NE* y *NO* debido a que la *To* al interior fue prácticamente igual al de la orientación *N* en las tres mediciones mencionadas ($\pm 0.03^{\circ}\text{C}$). Ver Gráfica 9. Por lo que las orientaciones seleccionadas como variables para generar el *Universo de Estudio* fueron, *E, SE, S, SO* y *O*.



Gráfica 9. Comparación de To en diferentes orientaciones. Fuente. Elaboración propia.

5.9 Generación de Universo de Estudio para el NZMCM.

Se consideraron 162 casos a partir de la vivienda monitoreada, con las variables base descritas anteriormente y expuestas en la ecuación donde se incluyen tres tipos de usuario U , tres tipos de muros M , tres tipos de losas L y seis orientaciones O .

$$UE = 3(U) \times 3(M) \times 3(L) \times 6(O) = 162$$

Para tener un control de cada caso e identificar más fácilmente las condiciones de los modelos, se asignó una clave a cada variable como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13.

Clave asignada a variables del modelo, elaboración propia

Variables	Concepto	ID
Orientación	Sur: 0°	O1
	Suroeste: 45°	O2
	Oeste: 90°	O3
	Norte: 180°	O4
	Este: 270°	O5
	Sureste: 315°	O6
Material Muro	Muro de block de 10 cm	M1
	Muro de block de 13 cm	M2
	Muro de concreto armado 12 cm	M3
Material Losa	Concreto armado: impermeabilizante elastomérico-concreto 10 cm	L1
	Concreto armado: loseta vidriada-pegazulejo-concreto 10cm-yeso	L2
	Vigueta de concreto y bovedilla de poliestireno 15cm	L3

Usuario	Usuario 1: Cinco integrantes por hogar, dos adultos y tres niños	U1
	Usuario 2: Tres integrantes por hogar, dos adultos y un niño	U2
	Usuario 3: Un integrante adulto por hogar	U3

Nota: Fuente. Elaboración propia.

5.10 Conclusión Capitular

En el capítulo quinto, se definió el caso de estudio para la investigación, el cual se acotó al Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México integrando a la información generada anteriormente sobre la región en el proyecto PROMEP. Los rangos mínimos y máximos de Temperatura Operativa para lograr el confort en el NZMVM de acuerdo al modelo adaptativo descrito (ASHRAE, 2010) $T_n = (T_{med} * 0.31) + 17.6$ son: para un 90% de satisfacción 19.89°C y 24.89°C respectivamente con una temperatura media de 22.4°C. y para un 80% de satisfacción 17.85 y 27.62.

Una vez definido el rango de confort térmico, se realizó un análisis climático incluyendo los siguientes factores: temperatura, humedad, precipitación y evaporación, índice ombrotérmico, radiación solar, viento y asoleamiento. De acuerdo al análisis, las principales condicionantes climáticas son las temperaturas medias por debajo del confort durante prácticamente todo el año, con excepción de los meses extremos de primavera. La radiación solar se encuentra dentro de los límites de confort por lo que se pueden generar ganancias solares de acuerdo al análisis de asoleamiento.

También se incluyen análisis a partir de herramientas como el Diagrama Bioclimático, Triángulos de Confort y el Diagrama Psicométrico a partir de los cuales se definieron los principales requerimientos bioclimáticos para la zona de estudio, los principales son: para la temporada de invierno: ganancias internas de calor, ganancias solares directas y protección solar de ventanas.

En el capítulo también se presentó el estudio de referencia del cual se extrajo la información de monitoreo de la vivienda en sitio y generación del modelo de simulación el cual fue calibrado y validado de acuerdo a la metodología descrita. El criterio de la investigación es un factor determinante en el procesamiento de datos. Si éste se hubiera basado únicamente en los valores de error, la calibración misma no hubiera sido necesaria, debido a que éstos valores son *aceptables* desde el modelo original (R0), sin embargo, revisando los datos de entrada, había discrepancias en las temperaturas de terreno con respecto al archivo base EPW del sitio.

El método seguido durante la calibración incita éste criterio de una manera metódica, proponiendo la *repetición del proceso* de calibración para identificar posibles errores o diferencias incoherentes. La revisión R15 muestra valores de error aceptables, sin embargo, la calibración no se concluyó en dicha revisión debido

a la repetición del proceso con el fin de mejorar el modelo y afinar los datos de entrada y por lo tanto la información de salida. Una vez que se tuvo un modelo validado, se aplicaron las variables estadísticas de orientación, usuario y materiales en la envolvente con el objetivo de representar una población de viviendas en base a un *Universo de Estudio* de 162 casos.

6. Evaluación del Universo de Estudio.

En el siguiente capítulo se expondrán los resultados obtenidos al simular los casos incluidos en el *UE* así como los cruces de información para relacionar los resultados. La información obtenida fue:

1. *Evaluación del Confort Térmico*: Se muestra la Temperatura Operativa T_o interior en cada vivienda para evaluar el confort térmico.

En base al análisis de dicha información se presenta:

- *Evaluaciones por Sistema Constructivo*: Relación del nivel de confort térmico interior con el tipo de usuario y el sistema constructivo de la envolvente.
- *Evaluaciones por Orientación*: Relación del nivel de confort térmico interior con el tipo de usuario y la orientación.

Se generaron simulaciones para evaluar el interior de la Recámara 1 en las condiciones más extremas las cuales incluyeron:

- *Evaluación de la Recámara 1 durante Verano*: Con cinco integrantes por vivienda *U1*
 - *Evaluación de la Recámara 1 durante Invierno*: Con un integrante por vivienda *U3*
2. *Cálculo de Balance Térmico*: Se presenta la relación del desempeño térmico de cada sistema constructivo de la envolvente con el tipo de usuario.

En base al análisis de dicha información se presenta:

- *Evaluación por Temperatura Operativa*: Relación del desempeño térmico de cada sistema constructivo de la envolvente con la T_o interior.

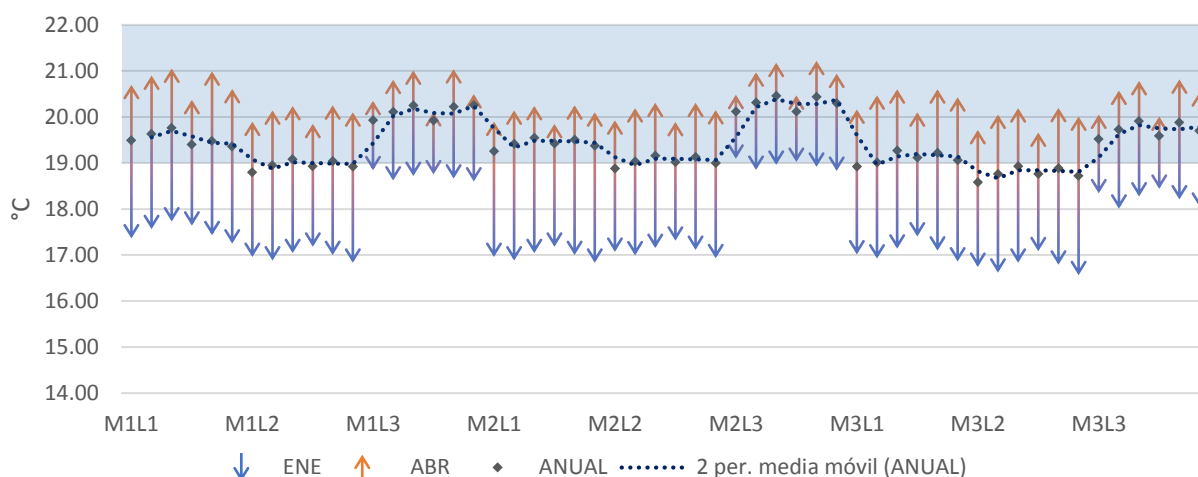
Con los resultados anteriores se formulará un primer *diagnóstico* que exponga la situación de las condiciones de confort térmico en la Vivienda Social de la *NZMCM* y el aporte de la envolvente a dichas condiciones.

6.1 Evaluación del Confort Térmico.

Los 162 modelos de simulación generados en *DesignBuilder* conforman el *UE* con las características de materiales, usuario y orientación descritas en la sección *Generación de Universo de Estudio para el NZMCM*. Las viviendas fueron simuladas con el motor de cálculo de *EnergyPlus* para conocer el Balance Térmico de la envolvente y la T_o al interior.

Para evaluar el confort térmico al interior de las viviendas se tomó como referencia el modelo de confort adaptativo incluido dentro del *ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2010) donde se establecen rangos de confort para un 90% y 80% de aceptación. Dichos rangos fueron expuestos en el apartado *Cálculo de Confort Térmico para el NZMCM*. Para los fines prácticos de la investigación, se realizó una primera exclusión en base a una aceptación del 80% dónde el límite inferior de confort térmico es de 19.09°C y el superior de 26.09°C.

En un principio, se realizaron simulaciones para conocer las T_o al interior de las viviendas de estudio y así generar una perspectiva global del desempeño térmico de acuerdo al tipo de usuario y a los sistemas constructivos, los datos obtenidos se muestran en el Anexo 2. Los resultados muestran una alta dependencia de la T_o interior al número de integrantes por vivienda por lo que los datos son presentados de acuerdo al tipo de usuario en las siguientes tres gráficas en las cuales el eje horizontal indica el sistema constructivo (cada *grupo* de sistema constructivo incluye los valores correspondientes a las seis orientaciones evaluadas y se presentan en el siguiente orden: *S, SO, O, N, E* y *SE*) y las líneas verticales de cada caso se forman con los valores de T_o para el mes de enero (más frío) y abril (más cálido); la T_o anual se representa con el marcador indicado seguido por una línea de tendencia media móvil y el recuadro sombreado en azul representa la zona de confort térmico.

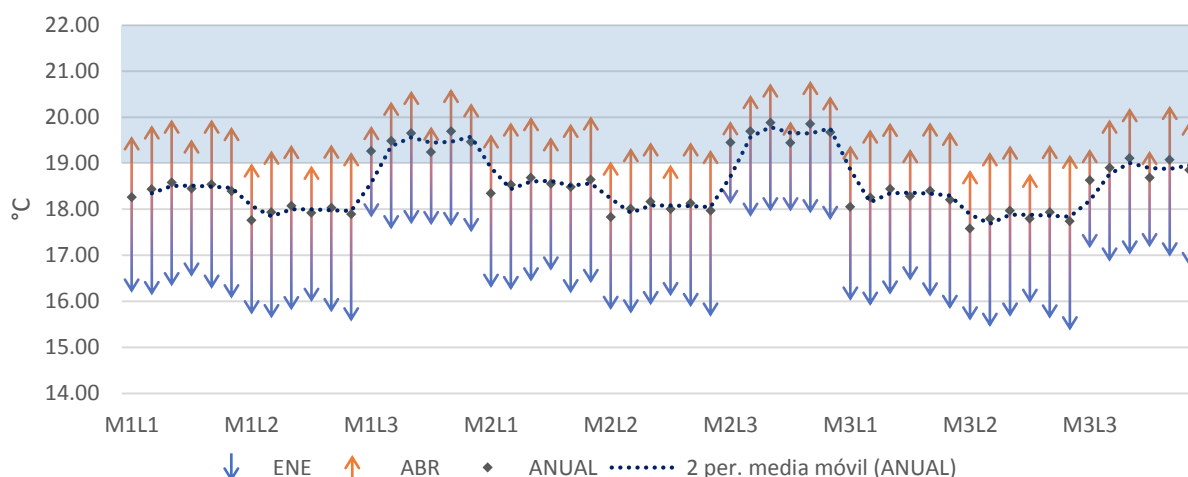


Gráfica 10. Evaluación del Confort Térmico para los casos con Usuario U1. Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 10 se muestran los resultados de T_o para los casos de estudio correspondientes al usuario *U1* (cinco integrantes por vivienda). Al analizar la gráfica se puede observar que la T_o en abril llega a rebasar los 21°C lo cual podría significar un problema de sobrecalentamiento en las tardes ya que los datos son promedios mensuales. Aun así, el principal problema se presenta durante invierno ya que las temperaturas

bajan hasta los 17°C, es decir 2°C por debajo del límite inferior de confort. La temperatura anual se mantiene dentro de la zona de confort en la mayoría de los casos aunque aquellos con losa tipo *L2* (concreto armado con loseta vidriada) principalmente, muestran T_o en el límite inferior de confort. De igual manera es evidente la baja oscilación de temperatura presentada con la losa *L3* en comparación a los otros sistemas de losas.

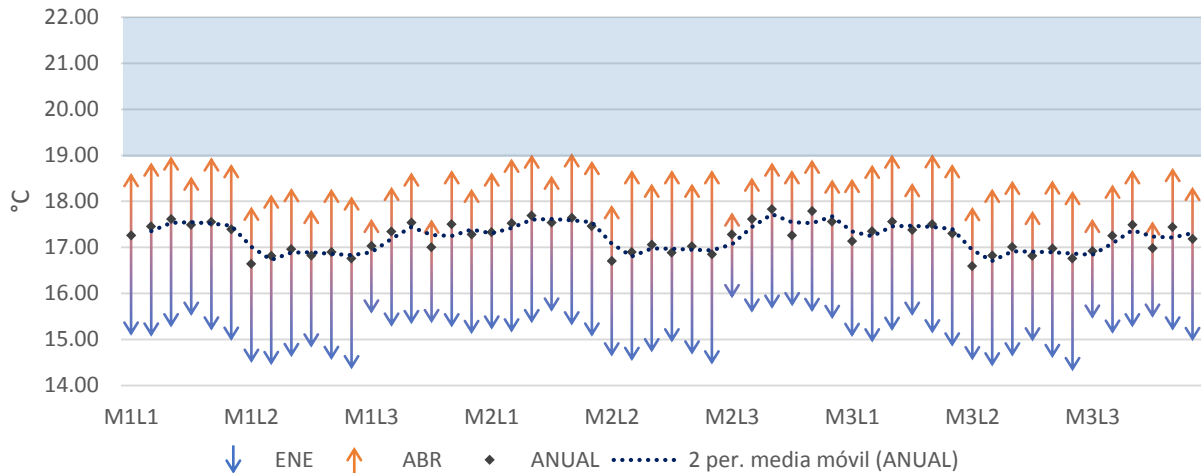
En la Gráfica 11 se muestran los resultados de T_o para los casos de estudio correspondientes al usuario *U2* (tres integrantes por vivienda). De acuerdo a los resultados, la T_o durante el mes de abril se encuentra dentro del rango de confort en la mayoría de los casos; durante invierno las temperaturas bajan hasta los 16°C, es decir 3°C por debajo del límite inferior de confort. La temperatura anual se mantiene por debajo de la zona de confort en la mayoría de los casos con excepción de aquellos con la losa *L3* (vigüeta y bovedilla) donde la T_o anual se mantiene dentro de la zona de confort. Este tipo de losa presenta valores significativamente más altos (1°C) tanto en enero como en abril así como una baja oscilación de temperatura en comparación a los otros sistemas de losas.



Gráfica 11. Evaluación del Confort Térmico para los casos con Usuario *U2*. Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 12 se muestran los resultados de T_o para los casos de estudio correspondientes al usuario *U3* (un integrante por vivienda). De acuerdo a los resultados la T_o se mantiene por debajo del rango de confort en todos los casos durante todo el año. La temperatura anual se mantiene entre los 17°C y 18°C, es decir, 1.5°C por debajo de la zona de confort aproximadamente. Para este tipo de usuario, los sistemas no muestran una diferencia de desempeño térmico tan evidente como en los dos casos anteriores debido a que las ganancias de calor al interior son menores y las condiciones dependerán en mayor medida de los factores

del clima al exterior. El bajo enfriamiento para este caso, significa un problema severo ya que la T_o interior durante enero desciende a menos de los 15°C, es decir, más 4°C debajo del límite inferior de confort térmico.

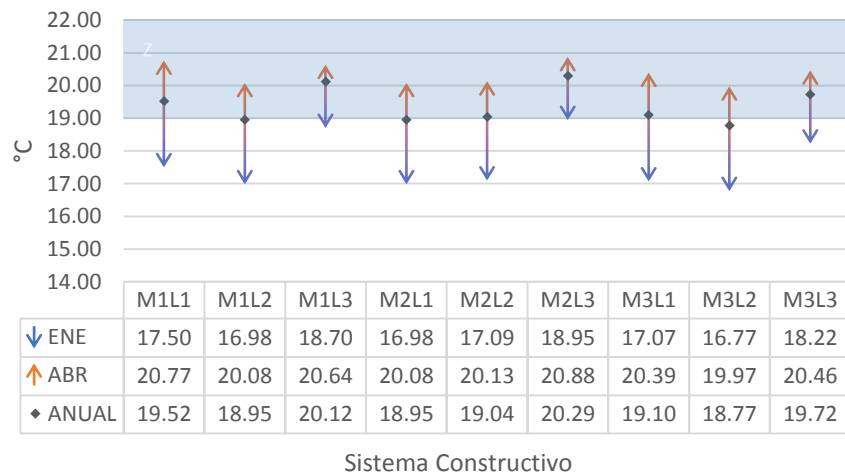


Gráfica 12. Evaluación del Confort Térmico para los casos con Usuario U3. Fuente: Elaboración Propia

6.1.1 Evaluación por Sistema Constructivo.

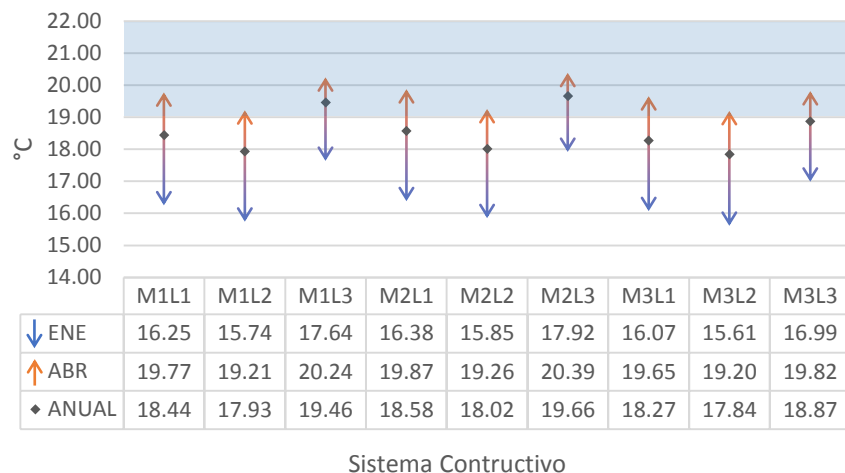
En esta primera evaluación es evidente el efecto del tipo de usuario en la T_o interior. En los siguientes apartados se muestran los resultados anteriores con cruces de datos para valorar el efecto del sistema constructivo y la orientación en la T_o interior, los datos se continúan diferenciando por tipo de usuario. Las gráficas mantienen el mismo formato que el capítulo anterior, diferenciando las T_o en enero, abril y anuales y resaltando el límite de confort térmico con un sombreado azul. Los datos son agrupados por medio del promedio de valores de acuerdo a la variable indicada.

En la Gráfica 13, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario $U1$ por sistema constructivo promediando los valores de las seis orientaciones. Como se puede observar, los casos con losas $L1$ (concreto armado con impermeabilizante) y $L3$ (vigüeta y bovedilla) tienen mejores aportaciones térmicas que aquellos con losa $L2$ (concreto armado con loseta vidriada) ya que presentan las T_o más altas y oscilaciones térmicas anuales menores. Asimismo, el muro $M2$ (block hueco de 13mm) tiene una mejor aportación que los muros $M1$ (block hueco de 10mm) y $M3$ (concreto armado de 10 cm) al presentar T_o ligeramente más elevadas (0.5°C aprox.). Las T_o anuales se encuentran dentro del rango de confort en cuatro casos, tres de los cuales tienen losas tipo $L3$, lo que refuerza las observaciones anteriores sobre el buen desempeño térmico de éste tipo de losa.



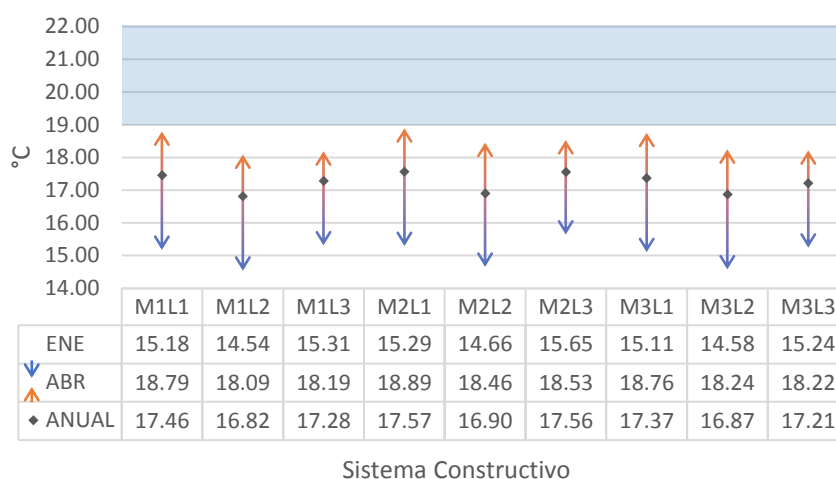
Gráfica 13. Evaluación por Sistema Constructivo para los casos con Usuario U1. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 14, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario $U2$ de acuerdo al sistema constructivo considerando las seis orientaciones. Las losas $L1$ y $L3$ demuestran mejores aportaciones térmicas que la losa $L2$ ya que al igual que con el usuario $U1$, presentan una T_o más alta y oscilaciones térmicas anuales menores. Asimismo, el muro $M2$ tiene un mejor desempeño térmico que los muros $M1$ y $M3$ con T_o más altas. Las T_o anuales se encuentran dentro del rango de confort en dos casos (ambos con losas $L3$). La T_o en abril se encuentra en confort en todos los casos pero en tres de ellos está al límite inferior de confort mientras que la T_o en enero se encuentra por debajo del límite de confort en todos los casos con una variación entre tipos de muros de 0.5°C y una variación entre tipos de losas de hasta 2°C .



Gráfica 14. Evaluación por Sistema Constructivo para los casos con Usuario U2. Fuente: Elaboración propia.

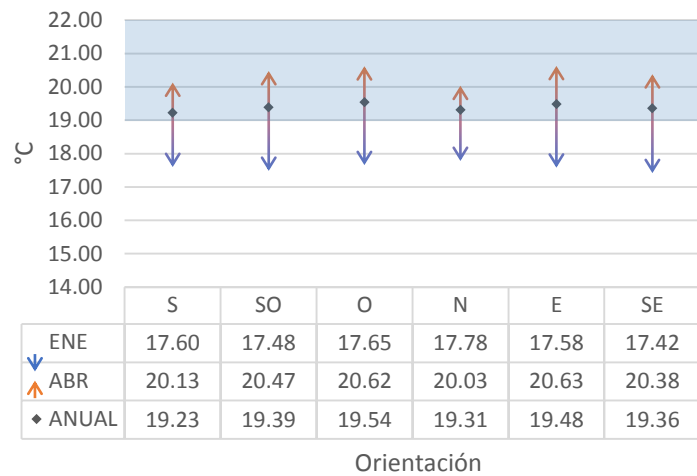
En la Gráfica 15, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario $U3$. Como se observa, las condiciones térmicas en el interior de la vivienda se encuentran por debajo del rango de confort durante todo el año. Las losas $L1$ y $L3$ tienen una mejor aportación que la losa $L2$ ya que como en los dos casos anteriores, presentan las T_o más altas aunque en este caso, los casos con losa $L1$ presentan T_o más altas durante abril y una oscilación térmica similar al de los casos con losas $L2$ (más de 3°C anualmente). Con este tipo de usuario el tipo de muro afecta en menor medida la T_o interior, como se puede observar en la gráfica, las variaciones entre los tres tipos son menores a 0.1°C .



Gráfica 15. Evaluación por Sistema Constructivo para los casos con Usuario $U3$. Fuente: Elaboración propia.

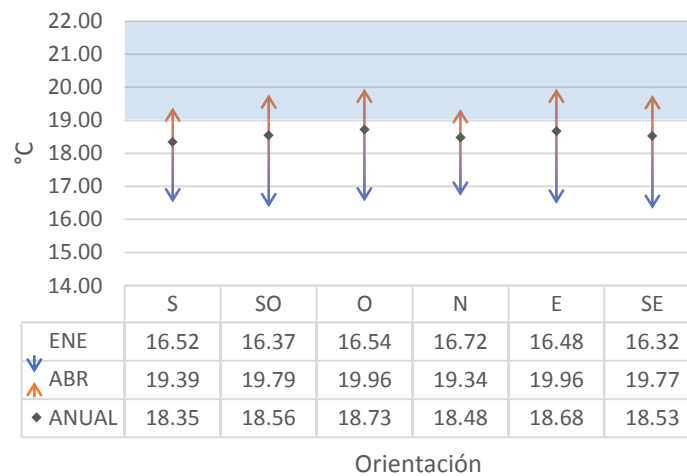
6.1.2 Evaluación por Orientación

En la Gráfica 16, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario $U1$ de acuerdo a la orientación considerando los nueve tipos de sistemas constructivos. En la gráfica se observa que las orientaciones O y E presentan las T_o interiores más altas y una amplia oscilación térmica anual; las orientaciones S y N presentan las T_o más bajas así como una baja oscilación térmica anual, siendo menor en el N , por último, las orientaciones SO y SE presentan una amplia oscilación y las temperaturas más bajas de los casos de estudio. De acuerdo a los promedios, las T_o anuales se encuentran dentro de confort en todos los casos al igual que las T_o en abril, mientras que en enero, las T_o se encuentran siempre por debajo de confort.



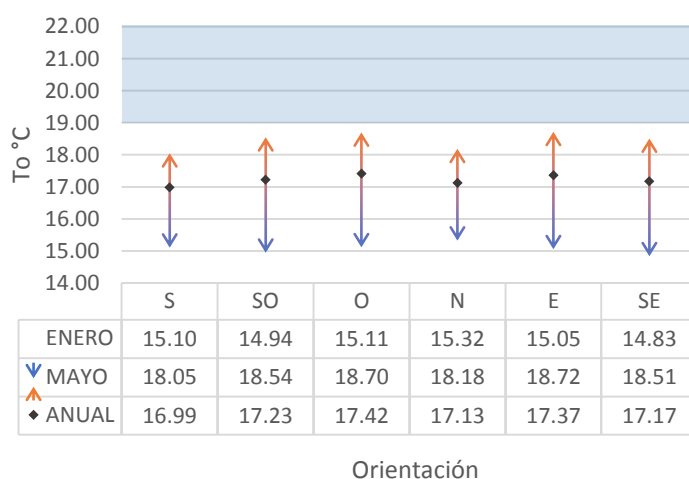
Gráfica 16. Evaluación por Orientación para los casos con Usuario U1. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 17, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario U_2 por orientación considerando los nueve tipos de sistemas constructivos. Las losas orientaciones O y E presentan las T_o interiores más altas y una amplia oscilación térmica anual; las orientaciones S y N presentan las T_o interiores más bajas una baja oscilación térmica anual, siendo menor en el N , por último, las orientaciones SO y SE presentan T_o interiores medias con una oscilación amplia que llega a las temperaturas más bajas de los casos de estudio. De acuerdo a los promedios, las T_o anuales se encuentran fuera de confort en todos los casos al igual que las T_o en enero, mientras que en abril, las T_o se encuentran siempre dentro del rango de confort.

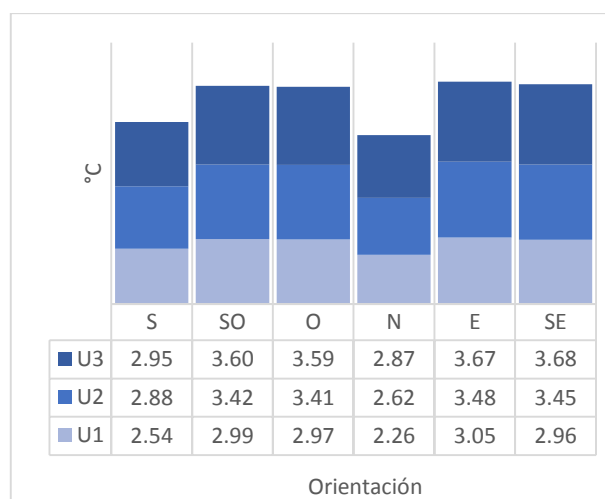


Gráfica 17. Evaluación por Orientación para los casos con Usuario U2. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 18, se muestran los promedios de T_o interior de la vivienda con el usuario U_3 por orientación considerando los nueve tipos de sistemas constructivos. Como se puede observar, las lasas orientaciones O y E presentan las T_o interiores más altas y una amplia oscilación térmica anual; las orientaciones S y N presentan las T_o interiores más bajas una baja oscilación térmica anual, siendo menor en el N , por último, las orientaciones SO y SE presentan T_o interiores medias con una oscilación amplia que llega a las temperaturas más bajas de los casos de estudio. De acuerdo a los promedios, las T_o anuales se encuentran fuera de confort en todos los casos.



Gráfica 18. Evaluación por Orientación para los casos con Usuario U3. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 19. Promedio de oscilación térmica para las orientaciones de estudio por tipo de usuario. Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 19, muestra el promedio de oscilación térmica por orientación considerando los nueve tipos de sistemas constructivos. De acuerdo a la gráfica, el tipo de uso de la vivienda tendrá una repercusión en la oscilación térmica interior, por lo que entre más ganancias latentes se tengan por ocupación, menos oscilación se presentará al interior y viceversa. En la gráfica se logra distinguir con mayor detalle, el efecto de cada orientación en la To ; la orientación N es la que presenta una oscilación menor seguida por la orientación S ; el resto de las orientaciones presentan oscilaciones térmicas similares.

A partir de las observaciones anteriores se formulan las siguientes afirmaciones con respecto a los sistemas constructivos:

- La To interior está estrechamente ligada al número de usuarios de la vivienda, donde las viviendas con cinco usuarios ($U1$) presentan temperaturas de $\approx 2^{\circ}\text{C}$ arriba de aquellas con un usuario ($U3$) por lo que cada caso tendrá requerimientos distintos de adecuación.
- Si la To interior anual se encuentra dentro de confort, no implica un confort térmico durante todo el año sin embargo la primera exclusión de casos de estudio serán aquellos que presenten una temperatura anual dentro de confort ya que en el Universo de Estudio representan los casos más favorables.
- La To interior está estrechamente ligada al sistema constructivo, sin embargo esta relación no es directa y depende del tipo de combinación, es decir, si un tipo de muro X presenta el mejor desempeño con un tipo de losa Y , no implica que ese mismo muro presentará el mejor desempeño con todos los tipos de losas y viceversa.
- A pesar de la afirmación anterior, el tipo de losa repercute en mayor medida al desempeño térmico interior que el tipo de muro.

Las siguientes afirmaciones se formularon a partir de las observaciones con respecto a las orientaciones:

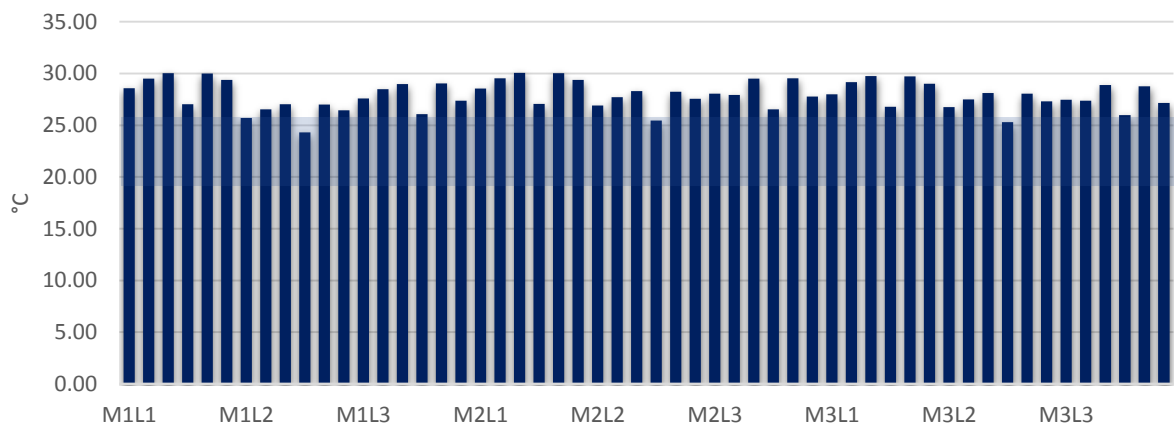
- La To interior está estrechamente ligada al número de usuarios de la vivienda, donde las viviendas con cinco usuarios $U1$ presentan temperaturas de $\approx 2^{\circ}\text{C}$ arriba de aquellas con un usuario $U3$ por lo que cada caso tendrá requerimientos distintos de adecuación.
- Si la To interior anual se encuentra dentro de confort, no implica un confort térmico durante todo el año sin embargo la primera exclusión de casos de estudio serán aquellos que presenten una temperatura anual dentro de confort ya que en el UE representan los casos más favorables.

- La orientación de la vivienda tiene un efecto relativamente bajo en el desempeño térmico de la vivienda, esto puede ser debido a que la superficie expuesta de la envolvente se resume al techo y dos fachadas las cuales reciben sombreado de viviendas vecinas.
- La oscilación de la To interior anual se encuentra estrechamente relacionada con el tipo de orientación.
- Dadas las condiciones de oscilación térmica presentadas en la evaluación anterior, es recomendable la simulación de los casos extremos de bajo calentamiento y posible sobrecalentamiento, es decir, las viviendas con usuario $U3$ durante temporada de invierno y viviendas con usuario $U1$ durante temporada de verano.

Una vez generado un análisis general, se recopiló información de To en la Recámara 1 debido a su prioridad como el espacio privado más habitable en la vivienda. La simulación se realizó para los casos más extremos del UE : To durante abril con el usuario $U1$ y To durante enero con el usuario $U3$. Los resultados de la evaluación se presentan a continuación.

6.1.3 Evaluación de Recámara 1 durante Temporada de Verano.

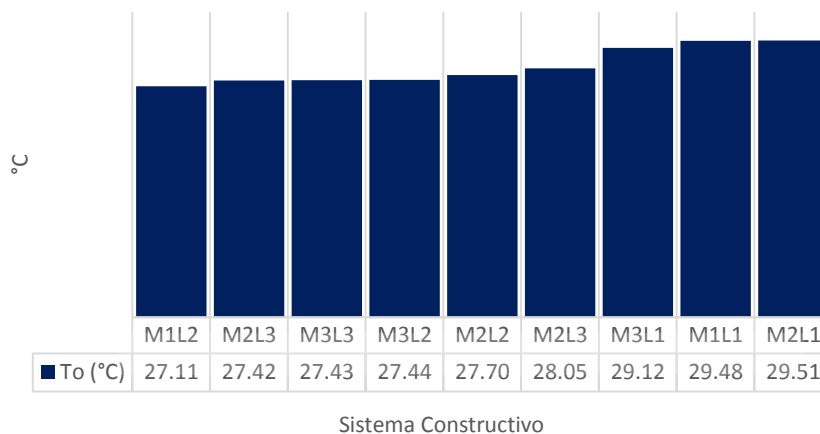
La evaluación que se presenta en esta sección corresponde únicamente a los casos con usuario $U1$ durante el mes de abril, donde las ganancias de calor al interior pueden resultar contraproducentes para el confort térmico con efectos de sobre calentamiento. Los datos recopilados los valores de To para cada caso se encuentran en el Anexo 2 y se muestran en la Gráfica 20 donde el eje horizontal indica el grupo de cada sistema constructivo el cual incluye seis orientaciones y el área con sombreado azul indica el rango de confort térmico.



Gráfica 20. Temperatura Operativa en la Recámara 1 con el usuario $U1$ durante el mes de abril.

Fuente: Elaboración propia.

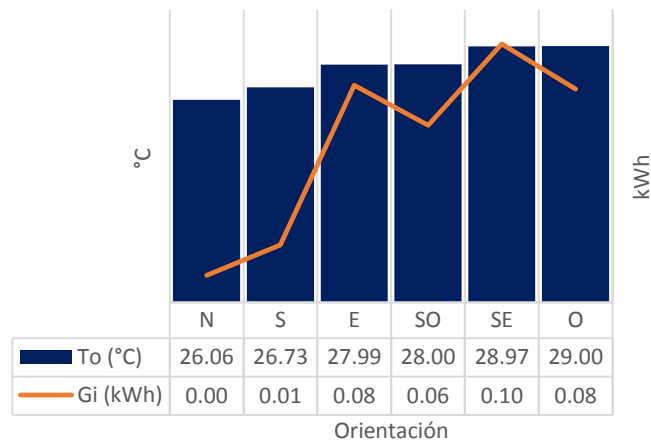
Como se puede observar, estos valores rebasan el límite superior de confort en la mayoría de los casos, para analizar el efecto del sistema constructivo y orientación, se muestran promedios de acuerdo cada variable a continuación.



Gráfica 21. Evaluación por Sistema Constructivo para los casos con Usuario U1 durante abril en la Recámara 1. Fuente. Elaboración propia.

En la Gráfica 21 se puede observar la relación de la T_o con el tipo de Sistema Constructivo. De acuerdo a los datos generados, los casos con losas $L2$ y $L3$ son los que presentan un sobrecalentamiento con temperaturas entre 27°C y 28°C mientras que los casos con losas $L1$ presentan temperaturas al interior por arriba de los 29°C , es decir, más de 3°C por arriba del límite superior de confort. Como se ha presentado en análisis anteriores, los tipos de muros no muestran un efecto térmico tan representativo como los tipos de losas.

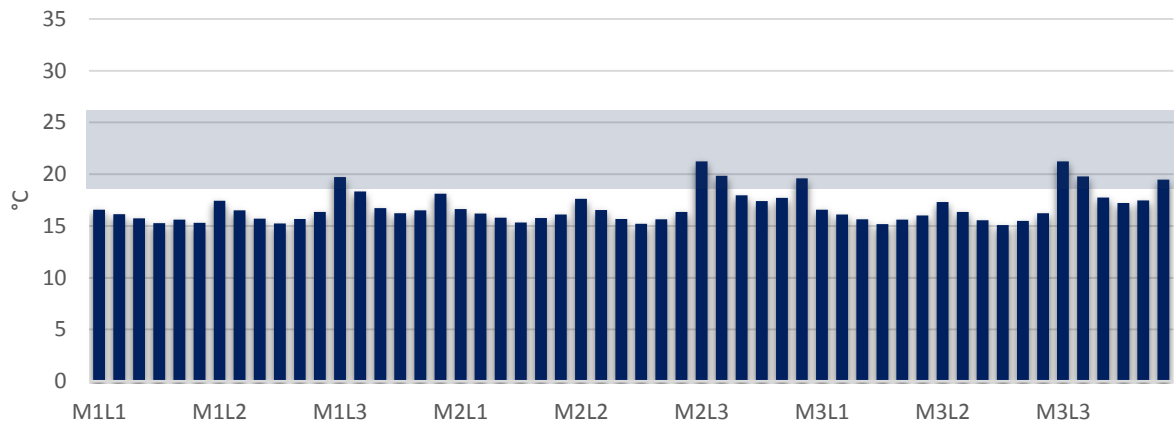
En la Gráfica 22 se muestran las T_o por orientación. Como se puede observar, la orientación N no presenta una temperatura promedio dentro del rango de confort y los casos con orientación S presentan el menor sobrecalentamiento con un promedio de T_o de 26.75°C . Las orientaciones E y SO muestran prácticamente la misma temperatura al interior de 28°C del mismo modo que las orientaciones SE y O . En la gráfica también se muestran el promedio de ganancias internas por ventanas exteriores durante el mismo periodo (eje derecho) como se puede observar, la relación de orientación es estrecha para estos dos datos por lo que pueden priorizarse las orientaciones donde la protección solar puede significar una mejoría para el confort térmico las cuales son SE y O , seguidas por E y SO . Las orientaciones SO y O presentan ganancias internas menores a las SE y E , sin embargo, las temperaturas exteriores son más altas por la tarde que por las mañanas por lo que las T_o serán mayores en las fachadas con orientación O .



Gráfica 22. Evaluación por Orientación para los casos con Usuario U1 durante abril en la Recámara 1. Fuente. Elaboración propia.

6.1.4 Evaluación de Recámara 1 durante Temporada de Invierno.

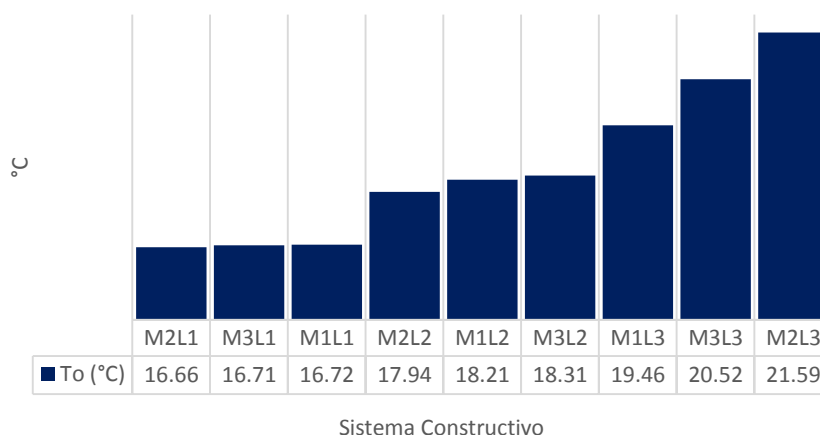
En el **Anexo 2** se muestran las temperaturas interiores para el mes de enero en la Recámara 1 con el usuario *U3*. Los datos recopilados se muestran en la Gráfica 23. Como se puede observar, únicamente cinco casos se encuentran dentro del rango de confort térmico y tienen como condicionante común la losa *L3*. Para poder realizar un análisis en base a la orientación y al sistema constructivo, los datos serán promediados al igual que en el apartado anterior por tipo de variable.



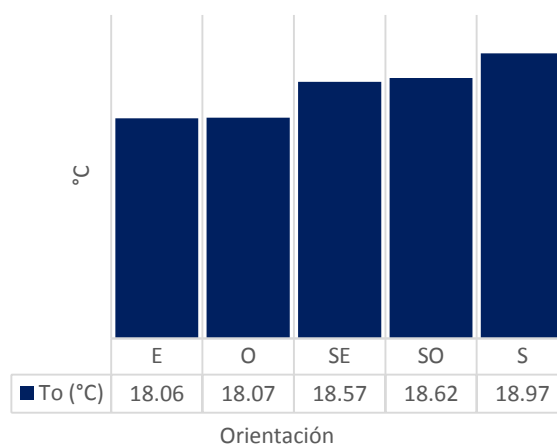
Gráfica 23. Temperatura Operativa en la Recámara 1 con el usuario *U3* durante el mes de enero. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 24 se muestran los resultados al agrupar los datos por Sistema Constructivo. En la gráfica se puede apreciar una tendencia de temperatura donde los sistemas constructivos con losas *L1* muestran los valores más bajos y los sistemas constructivos con losas *L2* muestran temperaturas más altas

(1.5°C en promedio). Por último, los sistemas constructivos con losas *L3* muestran las temperaturas más altas llegando a una *To* dentro del rango de confort en todos los casos por lo que indican un mejor desempeño térmico. La gráfica también evidencia el bajo efecto que el muro tiene sobre el desempeño térmico del sistema constructivo a comparación de la losa.



Gráfica 24. Evaluación por Sistema Constructivo para los casos con Usuario U3 durante enero en la Recámara 1. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 25. Evaluación por Orientación para los casos con Usuario U3 durante enero en la Recámara 1. Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 25 se generó al hacer una comparación por orientación donde se puede observar la influencia de ésta en las ganancias de calor durante enero. Como se predijo en el análisis de sitio, la orientación *S* y sus variantes (*SE* y *SO*) son las más adecuadas para el sitio de estudio, debido a los requerimientos de calentamiento durante la mayor parte del año. En las orientaciones *E* y *O* la temperatura

disminuye casi 1°C con respecto a la orientación *S* lo cual corresponde directamente a la cantidad de Ganancias Solares por Ventanas.

6.1.5 Resultados Generales

Las condiciones interiores de la vivienda dependen no sólo de la envolvente, sino en gran parte de las ganancias de calor al interior. Los casos con usuario *U1* presentan los mejores niveles de confort con la característica en común del sistema constructivo con losa *L3* (Vigueta y Bovedilla); en segundo lugar se encuentran aquellas con losa *L1* (Concreto Armado con impermeabilizante). El usuario *U2* presentó un menor número de viviendas en confort que mantuvieron la característica constructiva de la losa *L3*, sin embargo, para este usuario, los casos con muro *M1* (block hueco de 10 cm) no presentaron niveles óptimos de confort térmico. Para los casos con un usuario *U3* por el contrario, la *To* al interior se encuentra siempre por debajo del confort térmico establecido independientemente del tipo de sistema constructivo.

En la Tabla 14 se indican los grados centígrados por debajo de los límites de confort correspondientes al promedio de 6 viviendas por sistema (una por orientación). La envolvente compuesta por el muro *M3* (concreto armado de 12 cm) y la losa *L2* (Concreto armado: loseta vidriada-pegazolejo-concreto 10cm-yeso) es la que presenta más problemas de confort mientras que la envolvente compuesta por muro *M2* (muro de block de 13 cm) y losa *L3* (Vigueta de concreto y bovedilla de poliestireno 15cm) presentó los mejores niveles de confort, las variantes intermedias se muestran en orden vertical de acuerdo al tipo de usuario.

Tabla 14.

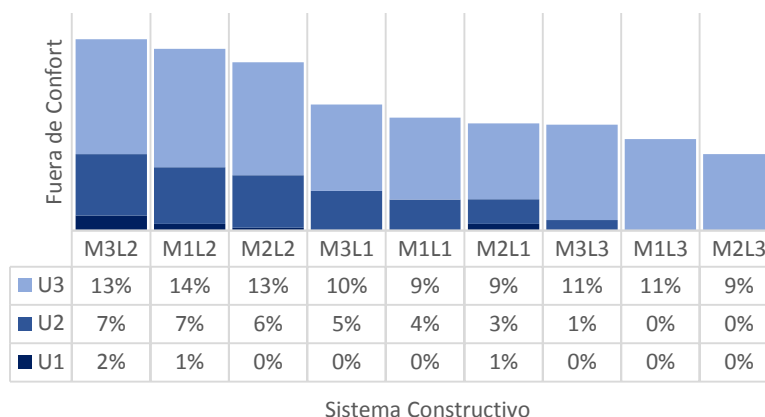
Suma de °C por debajo del rango de confort en las viviendas de acuerdo al modelo adaptativo, elaboración propia.

U1		U2		U3		Total	
SC	°C	SC	°C	SC	°C	SC	°C
M3L2	0.43	M3L2	1.40	M3L2	2.39	M3L2	4.22
M1L2	0.25	M1L2	1.27	M1L2	2.39	M1L2	3.90
M2L2	0.16	M2L2	1.18	M2L2	2.32	M2L2	3.67
M3L1	0.17	M3L1	0.93	M3L3	1.84	M3L1	2.94
M2L1	0.25	M1L1	0.76	M3L1	1.83	M2L1	2.83
M1L1	0.00	M2L1	0.66	M1L3	1.82	M1L1	2.48
M3L3	0.00	M3L3	0.33	M1L1	1.74	M3L3	2.07
M1L3	0.00	M1L3	0.00	M2L1	1.67	M1L3	1.67
M2L3	0.00	M2L3	0.00	M2L3	1.64	M2L3	1.64
Total	1.26	Total	6.53	Total	17.63	Total	25.41

Nota: Elaboración propia.

Los valores de la tabla anterior se sintetizan en la Gráfica 26 mostrando el desconfort térmico como el porcentaje que representan los °C por debajo de confort en relación a la *To* interior. Se puede observar

como el usuario *U1* presenta los mejores niveles de confort debido a que es una programación de 5 personas considerando horarios para dos adultos y tres niños con un porcentaje de disconfort de entre 1% y 2%; para el usuario *U2*, de dos adultos y un niño, la temperatura operativa disminuye habiendo sólo 12 casos de vivienda en confort¹² mostrando porcentajes de disconfort de hasta 7% dependiendo el caso. Por último, para el caso del usuario *U3* todos los casos de vivienda se encuentran por debajo de la temperatura de confort durante todo el año con porcentajes de disconfort de hasta 14%.



Gráfica 26. Porcentaje de temperatura fuera de confort de acuerdo al modelo adaptativo.
Fuente: Elaboración propia.

6.2 Cálculo de Balance Térmico.

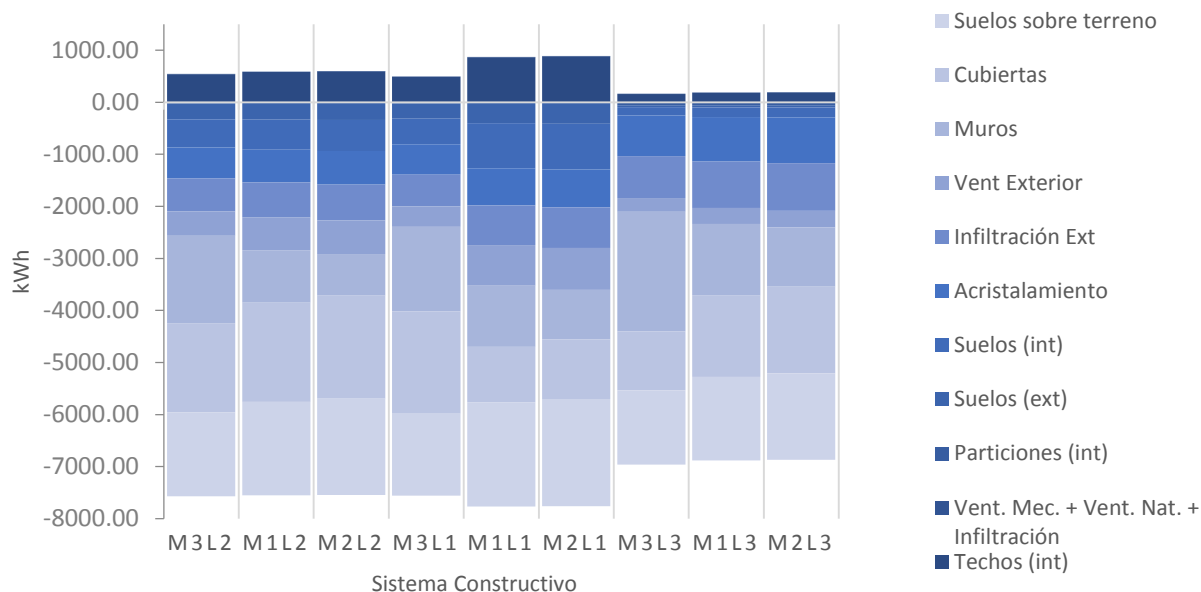
Los datos de pérdidas y ganancias de calor fueron recopilados de acuerdo al sistema constructivo y al usuario para sintetizar e identificar los elementos constructivos con mayores pérdidas de calor y la relación de las pérdidas con la T_o de cada vivienda, esta matriz es una herramienta de análisis que fue usada para identificar las deficiencias de cada vivienda y por lo tanto, priorizar las adecuaciones por caso. Los factores incluidos en el balance térmico son pérdidas o ganancias térmicas por: losas interiores, particiones o muros interiores, losas exteriores, suelos interiores, acristalamiento, infiltración exterior, ventilación exterior, muros exteriores, cubiertas o techos y suelos sobre terreno; para fines prácticos, se presentan los cinco factores con mayores pérdidas de calor así como el balance térmico total por sistema¹³.

A continuación, se presentan gráficamente los resultados obtenidos del cálculo de balance térmico para el usuario *U1*, *U2* y *U3* respectivamente los cuales se incluyen en el **Anexo 3**.

¹²Cada celda corresponde al promedio de seis viviendas con seis diferentes orientaciones.

¹³Cada celda corresponde al promedio de seis viviendas con seis diferentes orientaciones.

Para el usuario *U1* (Gráfica 27), la vivienda que presenta menores pérdidas de calor es la *M2L3* con un balance de -6677 kWh durante todo el año; por el contrario, la vivienda con mayores pérdidas de calor es la *M3L2* con un balance de -7029 kWh durante todo el año. En el sentido horizontal, los techos interiores presentan ganancias de calor en todos los casos y la suma del balance térmico de todos los casos durante todo el año es de 4474 kWh y por el contrario, el suelo sobre terreno es el elemento que presenta mayores pérdidas, la suma del balance térmico de todos los casos durante todo el año es de -15576 kWh.

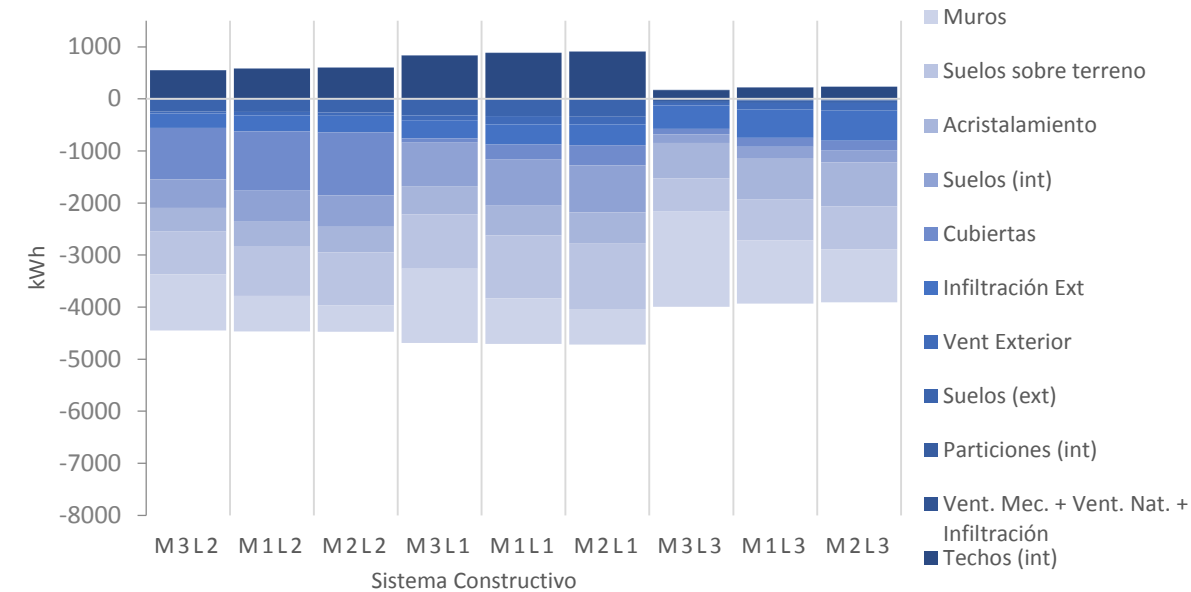


Gráfica 27. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario *U1*.
Fuente: Elaboración propia.

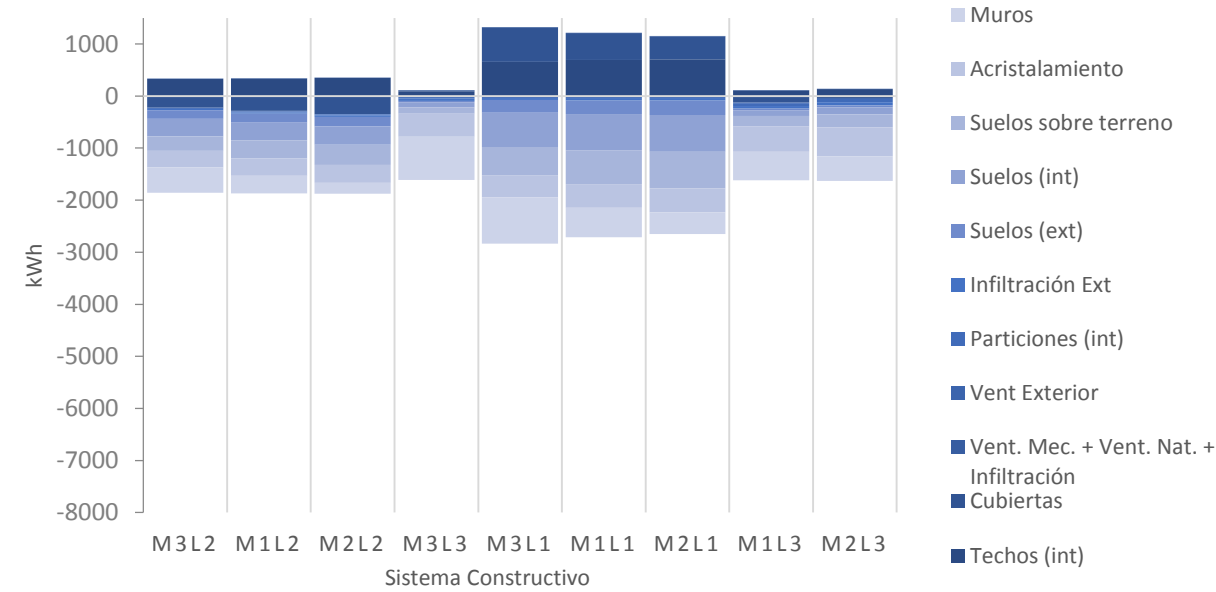
Para el usuario *U2* (Gráfica 28), la vivienda que presenta menores pérdidas de calor es también el caso *M2L3* con un balance de -3676 kWh durante todo el año; por el contrario, la vivienda con mayores pérdidas de calor es la *M3L2* con un balance de -3901 kWh durante todo el año. En el sentido horizontal los techos interiores presentan ganancias de calor en todos los casos y la suma del balance térmico de todos los casos durante todo el año es de 4962 kWh y por el contrario, los muros exteriores son los elementos que presentan mayores pérdidas, la suma del balance térmico de todos los casos durante todo el año es de -9327 kWh.

Por último, para el usuario *U3* (Gráfica 29), la vivienda que presenta menores pérdidas de calor es el caso *M2L3* con un balance de -1495 kWh durante todo el año y la vivienda con mayores pérdidas de calor es la *M3L2* con un balance de -1522 kWh durante todo el año. En el sentido horizontal los techos interiores presentan ganancias de calor en todos los casos y la suma del balance térmico de todos los casos durante

todo el año es de 1639 kWh y por el contrario, los muros exteriores son los elementos que presentan mayores pérdidas, la suma del balance térmico de todos los casos durante todo el año es de -1997 kWh.



Gráfica 28. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U2.
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 29. Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U3.
Fuente: Elaboración propia.

Si se relacionan los tres casos, se puede observar que los muros exteriores, suelos sobre terreno, acristalamiento y cubiertas son los elementos que presentan mayores pérdidas de calor, por lo que son los elementos donde se deben priorizar las adecuaciones. Cada caso en particular debe ser analizado debido a que la tabla esta ordenada de acuerdo a los totales generales, pero el orden de pérdidas de los elementos constructivos puede variar, por ejemplo, en el caso de la vivienda *M2L3* del usuario *U3* presenta las mayores pérdidas en el acristalamiento y no en los muros.

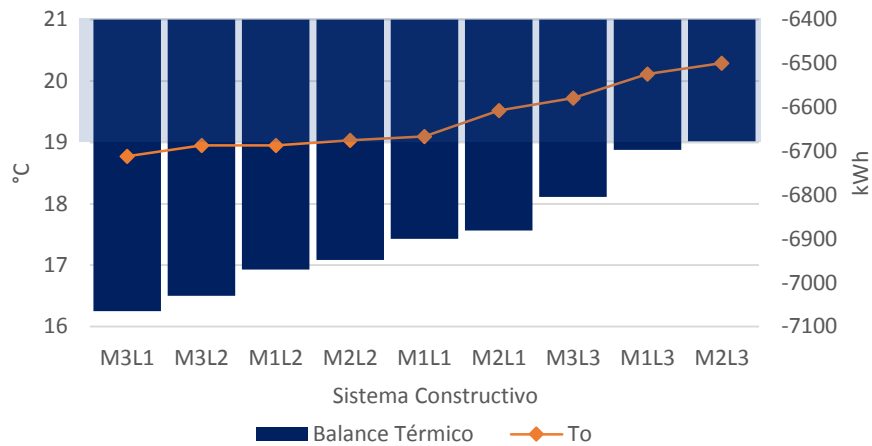
De acuerdo al orden de las filas de las tres tablas anteriores, los casos *M3L2*, *M1L2* y *M2L2* son los casos que presentan mayor pérdida de calor en sus elementos constructivos durante el año, la constante de la losa *L2* (Concreto armado, loseta vidriada-pegazolejo-concreto 10cm-yeso) en los tres casos indica un claro problema en dicha losa que sin importar el tipo de muro con el que sea construida, afectara en sentido negativo el confort y las ganancias de calor por la envolvente.

El siguiente caso problemático es la losa *L1* (Concreto armado: impermeabilizante elastomérico-concreto 10 cm), la cual se presenta en los siguientes tres lugares para el usuario *U1* y *U2*, y para el caso *U3* se presenta a partir del cuarto lugar. Como se puede observar en las tablas, las cubiertas no son los elementos con mayores pérdidas ni se encuentran en los primeros lugares con excepción de pero es importante recalcar el impacto que tiene en el desempeño de los otros elementos. Por último la losa *L3* (Vigueta de concreto y bovedilla de poliestireno 15cm) se encuentra en los últimos lugares, es notoria la propiedad aislante que aporta el poliestireno y como mejora las condiciones de los demás elementos como se ha mostrado en las evaluaciones previas.

6.2.1 Evaluación por Temperatura Operativa

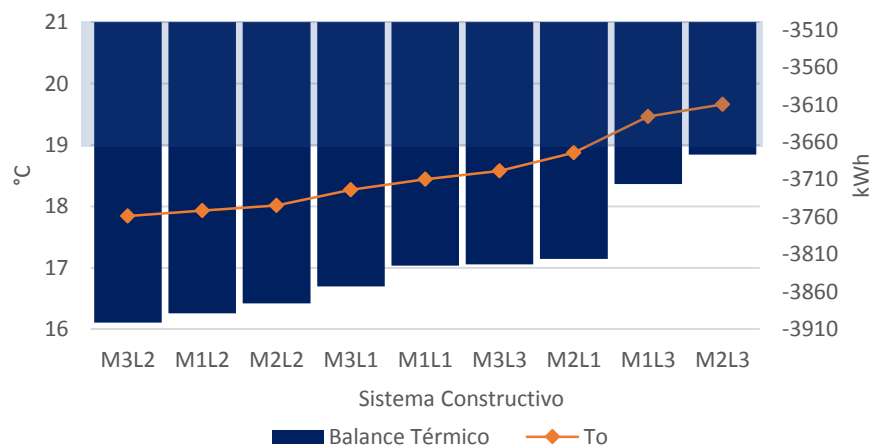
Una vez identificados los sistemas constructivos que presentan mayores pérdidas de calor y los elementos de la envolvente más vulnerables a los flujos de calor por convección, resulta pertinente conocer el efecto que este fenómeno tiene en las temperaturas interiores y por consiguiente, en el confort térmico. Para esto, se presentan las siguientes tres gráficas, cada una corresponde a un tipo de usuario como se ha manejado a lo largo del documento. En cada gráfica se muestra el balance térmico anual en kWh así como la *To* interior en °C correspondiente a cada sistema constructivo. El rango de confort térmico se resalta con un sombreado azul.

En la Gráfica 30 se muestran los valores para el usuario *U1*. Como se puede observar, las pérdidas de calor están directamente relacionadas con las *To* al interior donde las pérdidas anuales totales de acuerdo al cálculo de Balance Térmico, fluctúan entre 6650 kWh y 7100 kWh mientras que las temperaturas oscilan dependiendo el sistema constructivo entre 18.5°C y 20.5°C aproximadamente.



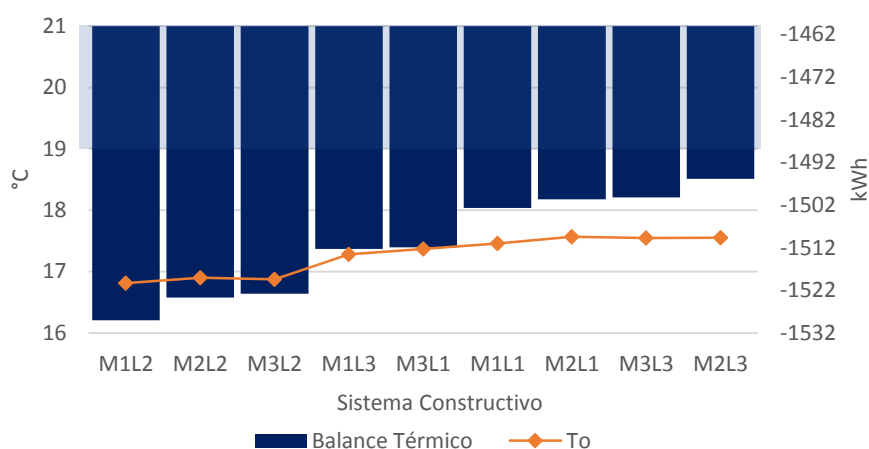
Gráfica 30. Evaluación por Temperatura Operativa para los casos con Usuario U1.
Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 31 se muestran los valores para el usuario *U2*, como se mostró en la sección anterior, la pérdida de calor en un edificio o vivienda dependerá en gran medida del número de usuarios en él y el tipo de uso de los espacios. Como se puede observar para este caso, las pérdidas de calor anuales son menores y fluctúan entre 3900 kWh y 3650 kWh, es decir, casi el 50% de pérdidas que en el caso del usuario *U1*, sin embargo, las temperaturas interiores oscilan entre 17.8°C y 19.5°C aproximadamente dependiendo el sistema constructivo.



Gráfica 31. Evaluación por Temperatura Operativa para los casos con Usuario *U2*.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la Gráfica 32 se muestran los valores para el usuario *U3*, para este caso, las pérdidas de calor también disminuyen considerablemente ya que las ganancias internas de calor son muy bajas con sólo un integrante en la vivienda. El cálculo de Balance Térmico, muestra pérdidas de entre 1530 y 1500 y las temperaturas interiores oscilan entre 16°C y 17.5 manteniéndose siempre por debajo del rango de confort térmico.



Gráfica 32. Evaluación por Temperatura Operativa para los casos con Usuario *U3*.
Fuente: Elaboración propia.

6.3 Conclusión Capitular.

En el sexto capítulo se presentó la Evaluación del Desempeño Térmico Interior de las Viviendas de estudio presentando resultados de Confort en unidades de T_o (°C) y de Balance Térmico en unidades de pérdidas o ganancias de calor por Sistema Constructivo y por orientación (kWh). En base a una evaluación anual y mensual, el 30% de los casos de estudio se encuentran dentro del rango de confort térmico mientras que el 70% presentan T_o anuales de bajo calentamiento; la orientación de la vivienda afecta en menor medida y tiene un mayor efecto en la oscilación térmica entre el mes más cálido y el mes más frío ya que la orientación *N* presenta una menor oscilación anual seguida por la orientación *S*, mientras que el resto de las orientaciones (*SE*, *E*, *O* y *SO*) muestran prácticamente los mismos grados de oscilación (Gráfica 19).

El elemento constructivo de la envolvente que tiene mayor impacto sobre el confort térmico interior es la losa. Como se puede observar en la Gráfica 26, las tres primeras columnas (izquierda a derecha) de la gráfica con las T_o más bajas, son sistemas constructivos con losas *L2* (Losa de concreto con loseta vidriada); las tres siguientes columnas indican T_o más altas y corresponden a la losa *L1* (Losa de concreto con impermeabilizante); Los tres últimos tres lugares que representan las T_o más altas o con mayor confort térmico, corresponden a sistemas constructivos con losas *L3* (losa de vigueta y bovedilla). La diferencia del

caso más conveniente al más inconveniente térmicamente, tiene una diferencia de 1°C anual aproximadamente.

Los casos con usuarios *U1* y *U3* presentaron un desempeño térmico característico de la vivienda. Las recámaras son consideradas los espacios más importantes de la vivienda en cuanto a confort térmico, ya que es el espacio privado más habitable, es por esto que los modelos fueron simulados durante abril para el usuario *U1* y durante enero para el usuario *U3* para obtener datos de *To*

Los elementos constructivos de la envolvente que presentan mayores pérdidas de calor de acuerdo al Balance Térmico son Suelos Sobre Terreno, Muros y Losas o Cubiertas, aunque la pérdida de kWh dependerá en mayor medida por la cantidad de integrantes por vivienda por lo que las adecuaciones deberán proponerse de acuerdo al tipo de usuario.

En la Tabla 15 se muestran una jerarquización de la implementación de aislantes de acuerdo a la pérdida de calor en los elementos constructivos. La tabla se divide por tipo de usuario. Las columnas *C*, *M* y *S* se refieren a cubiertas, muros y suelos sobre terreno respectivamente y las filas muestran los sistemas constructivos evaluados en la investigación. De esta forma, el número correspondiente a cada celda indica por jerarquía el elemento que presenta mayores pérdidas de calor y por lo tanto, aquel que debe ser aislado térmicamente. Para el usuario *U1* no se incluyen los casos que en la sección 6.1 *Evaluación de Confort* mostraron una *To* dentro del rango de confort. La omisión de algunos casos de techos en la jerarquización de casos con el usuario *U3* se debe a que estos elementos presentaban ganancias en Balance Térmico anual y no pérdidas como el resto de los elementos por lo que el aislamiento resultaría contraproducente si se busca aumentar las *To* al interior¹⁴.

Tabla 15.
Jerarquización de adecuación por sistema constructivo.

	Usuario			Usuario U2			Usuario U3		
	C	M	S	C	M	S	C	M	S
M1L1				3	2	1	3	2	1
M1L2	1	3	2	1	3	2	3	2	1

¹⁴ Los casos de estudio con un usuario *U3* son los que presentan temperaturas operativas más bajas al interior y por lo tanto menores pérdidas o incluso ganancias de calor ya que la diferencia de temperatura exterior e interior no es tan alta como en los casos con el usuario *U1* y *U2*.

M1L3				3	1	2		3	1	2
M2L1	2	3	1	3	2	1			2	1
M2L2	1	2	3	1	2	3		2	3	1
M2L3	2	3	1					3	1	2
M3L1	1	2	3	2	1	3			1	2
M3L2	1	2	3	2	1	3		3	1	2
M3L3									1	2

Nota: Elaboración propia.

En las celdas correspondientes al usuario, se puede observar que los suelos sobre terreno y las cubiertas se encuentran en primer lugar en cuatro ocasiones; en segundo y tercer lugar predomina el aislamiento en muros. Para las viviendas con este tipo de usuario no existe una tendencia relevante debido a que las ganancias latentes al interior de la vivienda disminuyen los requerimientos de calentamiento al interior.

En las celdas correspondientes al usuario *U2* los muros tienen una tendencia al requerimiento de aislamiento ya que se encuentran en el primer lugar de pérdidas en cinco casos, también se puede observar que el muro *M3* (concreto armado de 12 cm) presenta las mayores pérdidas en los tres casos lo que indica un desempeño deficiente del sistema constructivo a comparación de los otros dos sistemas de muro. En segundo lugar predominan las cubiertas sobre los suelos sobre terreno presentándose en cinco casos, tres de los cuales corresponden a la losa *L3* (vigueta de concreto con bovedilla de poliestireno expandido) lo que indica un mejor desempeño térmico en este sistema a comparación de los otros dos sistemas de losa.

En las celdas correspondientes al usuario *U3*, se puede observar la tendencia del primer lugar a los muros y como en el caso del usuario *U2*, el muro *M2* se mantiene en primer lugar en todos los casos lo que afirma el bajo desempeño del sistema. En segundo lugar predominan los muros y el suelo sobre terreno ambos con tres casos y en tercer lugar se encuentran las cubiertas con tres de cuatro de los casos con pérdidas de calor. La losa *L1* (Concreto armado con impermeabilizante) presenta ganancias en dos de los casos lo que indica un bajo retardo térmico con respecto a los otros sistemas de losas. El muro *M1* (Block hueco de 10 cm) se encuentra en tercer lugar en los tres casos evaluados a comparación del muro *M2* (Block hueco de 13 cm) lo que indica una mayor inestabilidad con un tercer lugar, segundo lugar y un caso con ganancias

de calor. En la *Gráfica 29* se puede observar que la cantidad de calor perdido por cubiertas es mayor para los casos con muro *M1* que los casos con muros *M2*, lo que explica esta variación.

El cruce de datos para relacionar las pérdidas y ganancias de calor a partir del cálculo de Balance Térmico con las *To* al interior de las viviendas de acuerdo al tipo de sistema constructivo permitió evidenciar la relación entre estos dos valores reforzando las estrategias propuestas en la sección *Resumen de Estrategias de Control de acuerdo a los Requerimientos Bioclimáticos*. donde se propone disminuir los flujos de calor tanto en temporada fría como calurosa para beneficiar el confort térmico interior.

7. Diseño de Soluciones Constructivas.

En este capítulo, se presenta la selección y diseño de soluciones constructivas de acuerdo a las pautas establecidas de acuerdo a los *Requerimientos bioclimáticos* establecidos. El bajo calentamiento es el principal problema que se presenta durante las mañanas de todo el año y tardes de la mayoría de los meses si se consideran las temperaturas exteriores. En base a la *Evaluación del Universo de Estudio*, y al *Cálculo de Balance Térmico*, presentado anteriormente se puede suponer que las bajas temperaturas al interior de la vivienda pueden ser compensadas si se reducen los flujos de calor por conducción, es decir, se evita la pérdida de calor en el interior de las viviendas para lo que se propone aislamiento de los elementos constructivos de la envolvente.

Para los casos que presentan condiciones extremas de bajo calentamiento (usuario U3), es necesario tomar medidas que aumenten las ganancias internas de calor. Los índices de radiación en el análisis climático, indican un potencial para las ganancias de calor por lo que se propone el muro trombe como un sistema de calentamiento solar pasivo.

En el caso del usuario U1, donde los problemas presentados son de sobrecalentamiento, el objetivo es evitar las ganancias internas. Debido a que las ganancias latentes por uso no pueden reducirse dado el número fijo de usuarios, la reducción de ganancias por radiación en las ventanas resulta una estrategia de control factible por lo que se propone el uso de dispositivos de control solar para evitar dichas ganancias.

Para este último caso, el aislante en losa también puede resultar conveniente al evitar los flujos de calor por conducción pero en este caso, con el objetivo de evitar que la temperatura exterior aumente la temperatura interior. Las soluciones constructivas propuestas por cada estrategia mencionada anteriormente se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.
Soluciones constructivas por estrategia de control.

Diagnóstico de vivienda	Estrategia	Propuesta Constructiva
Bajo calentamiento	Promover ganancias solares por radiación	Muro Trombe
	Minimizar flujos de calor por conducción	Aislamiento térmico de envolvente
Sobre calentamiento	Minimizar ganancias solares por radiación	Dispositivos de control Solar
	Minimizar flujos de calor por conducción	Aislamiento térmico de Envolvente

Nota: Elaboración propia.

A continuación se describe cada solución constructiva, las principales características y las condicionantes que rigen la integración.

7.1 Aislamiento en Envolvente.

La reducción de pérdida de calor mediante niveles superiores de aislamiento sigue siendo la medida más eficaz para conservar la energía (Energy Research Group, 2007). Donald Watson, en su libro *Climatic Building Design* (Watson & Labs, 1992), establece que “*El aislamiento será una aportación térmica siempre y cuando la temperatura exterior del edificio se encuentre por debajo de la zona de confort (cuando el calentamiento interior sea necesario) [...] otro uso para el aislamiento es mantener el interior de las superficies a una temperatura más alta durante el invierno. El aislante debe de ser colocado dondequiera que exista un flujo de calor*”.

Las opciones de aislantes en México son cada vez más amplias, las variables incluyen factores como resistencia térmica, precio y apariencia, dichas variables deben ser consideradas de acuerdo a las prioridades del usuario. En la siguiente sección, se presenta una evaluación *sustentable* que considera los factores económicos (precio), ambientales (carbono incorporado) y sociales (resistencia térmica¹⁵) con el objetivo de realizar una decisión selectiva sobre las opciones que resulten más convenientes.

7.1.1 Disposición del Aislamiento Térmico.

En el libro *Eficiencia Energética en los Edificios* (Fernandez, 2011) los aislantes térmicos en los edificios son clasificados según la disposición para la rehabilitación de la envolvente en rehabilitación por el interior, rehabilitación por el exterior y rehabilitación por inyección en cámaras. De acuerdo a los sistemas constructivos evaluados en la investigación, solamente es posible integrar las dos primeras opciones a los casos de estudio. Estas opciones se describen brevemente a continuación.

Rehabilitación por el exterior

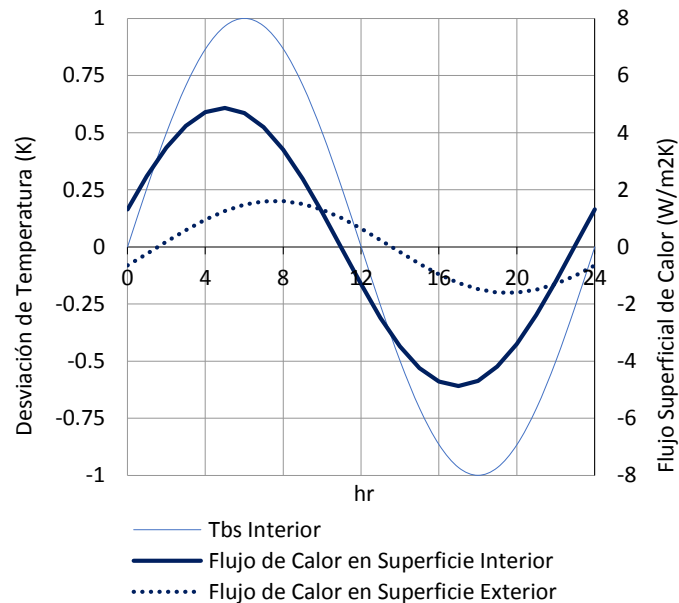
Este tipo de aislamiento permite eliminar puentes térmicos causados por elementos estructurales. También reduce las variaciones en la temperatura interior mejorando la capacidad térmica del edificio. Este tipo de rehabilitación es más conveniente para edificios que cuenten con cargas interiores constante por ocupación de modo que la inercia térmica estabilice las temperaturas.

¹⁵ La resistencia térmica es considerada como un factor social debido al beneficio que brindará al usuario al mejorar las condiciones de confort térmico al interior de la vivienda.

Rehabilitación por el interior

De acuerdo a Fernández, la rehabilitación al interior se recomienda para viviendas con periodos desocupados, por ejemplo, viviendas de fin de semana, es decir, ya que se consigue calentar la vivienda con la mayor efectividad y rapidez a diferencia del aislante por el exterior en donde las cargas internas para alcanzar la temperatura deseada deben ser mayores ya que se debe calentar también el sistema constructivo.

La disposición de los aislantes dentro de la investigación se rige por los datos obtenidos en las secciones *Requerimientos bioclimáticos* y *Cálculo de Balance Térmico*, de acuerdo a las cuales, es una prioridad minimizar los flujos de calor por conducción a través de la envolvente. Analizando el flujo de calor cuantitativamente a partir de la posición exterior e interior del aislamiento térmico con relación al sistema constructivo sin aislante, se obtuvieron los siguientes resultados:

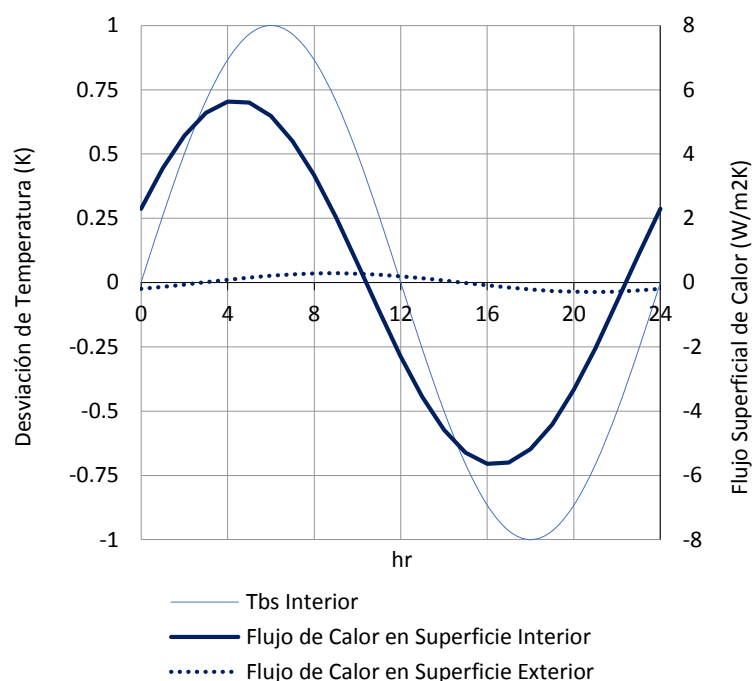


Gráfica 33. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo sin aislante. Fuente: Elaboración propia en base a *Dynamic Thermal Property Calculator1.0* (The Concrete Center, 2009)

La Gráfica 33 muestra los resultados correspondientes a un sistema constructivo de concreto armado ($e=10\text{cm}$) con una capa mortero en el exterior ($e=1\text{cm}$) y una capa mortero en el interior ($e=1\text{cm}$). Como se puede observar, los flujos de calor de la superficie interior presentan una relación directa con las Temperaturas de Bulbo Seco Interiores (Tbs) con cerca de $\pm 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ por cada unidad de oscilación K . Por

el contrario, las superficies exteriores muestran valores de flujo superficial de calor de menos del 50% (± 1.8) W/m²K. El factor de decremento Fd^{16} con Respecto a la exterior es de 0.80.

La Gráfica 34 muestra los resultados correspondientes al mismo sistema constructivo con la integración de aislante térmico al exterior. Como se puede observar, los flujos de calor de la superficie interior valores de cerca de ± 6 W/m²K por cada unidad de oscilación K. Por el contrario, las superficies exteriores muestran valores de flujo superficial de calor de menos del ± 0.3 W/m²K, lo que indica una disminución de flujos de calor en la superficie exterior. Para este caso, el Fd es de 0.43 evidenciando la disminución de dependencia de la Temperatura Interior a las condiciones exteriores.

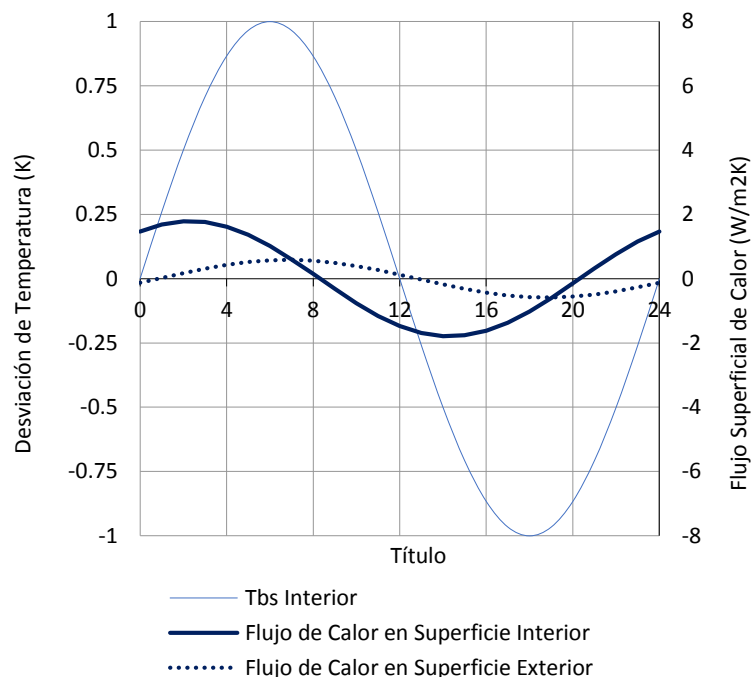


Gráfica 34. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo sin aislante.
Fuente: Elaboración propia en base a *Dynamic Thermal Property Calculator 1.0* (The Concrete Center, 2009)

Por último la Gráfica 35 muestra los resultados correspondientes al mismo sistema constructivo con la integración de aislante térmico al interior. Para este caso, los flujos de calor de la superficie interior presentan valores de cerca de ± 1.8 W/m²K por cada unidad de oscilación K. Por el contrario, las superficies exteriores muestran valores de flujo superficial de calor de ± 0.5 W/m²K, lo que indica una disminución de flujos de calor en ambas superficies lo cual resulta contraproducente para el tipo de requerimientos climático ya que se busca tener pérdidas de calor bajas al exterior y permitir flujos de calor al interior para aumentar

¹⁶ Indica la relación de la Temperatura Superficial Interior con Temperatura Superficial Exterior. El desempeño térmico de un sistema constructivo es inversamente proporcional al Fd .

la temperatura. Para este caso, el Fd es de 0.69 lo que indica un mayor flujo de calor en la superficie exterior que en el caso anterior y por lo tanto un peor desempeño térmico.



Gráfica 35. Flujos de Calor por unidad de oscilación en Temperatura Interior para ejemplo con aislante al interior. Fuente: Elaboración propia en base a *Dynamic Thermal Property Calculator 1.0* (The Concrete Center, 2009)

7.1.2 Comparación de Aislantes considerando Tres Variables de Evaluación:

Dentro del documento *Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application*, (Ehsan Asadi, 2012) se propone una metodología a partir de la cual es posible evaluar soluciones de adecuación considerando dos variables: el costo de rehabilitación y el ahorro de consumo energético, la ecuación propuesta por Aasdi se plantean a continuación donde Z_1 representa el costo de rehabilitación por lo que el caso ideal tiende a aumentar; Z_2 representa el ahorro de consumo energético por lo que el caso ideal tiende a disminuir y $\lambda_1 \lambda_2$ son los pesos asignados a cada variable de acuerdo a la importancia en la evaluación así que la suma de ambas siempre será igual a 1. Ver Ecuación 1.

En un principio, se identificaron y acotaron los casos de estudio, es decir una serie de soluciones disponibles para el proyecto en particular. A partir de este universo de estudio, se recopiló la información de cada variable (costo y ahorro energético), la ecuación muestra este universo en la expresión $Z_1(x)$ para los valores de costo de rehabilitación y $Z_2(x)$ para los valores de consumo energético. Figura. 29 muestra esquemáticamente el primer paso.

Ecuación 1

$$\begin{aligned} & \text{Min } \{a\} \\ & a \geq \left(Z_1(x) - Z_1^* \right) \left(\frac{\lambda_1}{Z_1^*} \right) \\ & a \geq \left(Z_2^* - Z_2(x) \right) \left(\frac{\lambda_2}{Z_2^*} \right) \\ & a \geq 0 \end{aligned}$$

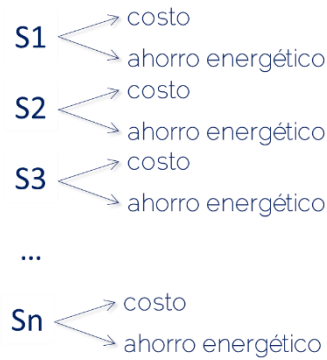


Figura. 29. Variables de cada solución a partir de los casos de estudio disponibles.
Fuente: Elaboración propia.

La condición propia de cada variable resulta conflictiva ya que mientras el costo de rehabilitación ideal tiende a aumentar, el ahorro de consumo energético ideal tiende a disminuir, esta condición se expresa en la ecuación donde Z_1^* es el menor costo de rehabilitación y Z_2^* es el mayor ahorro de consumo energético. En este paso, se identifican los casos que respondan mejor a los requerimientos u objetivos buscados en cada campo. Figura. 30.

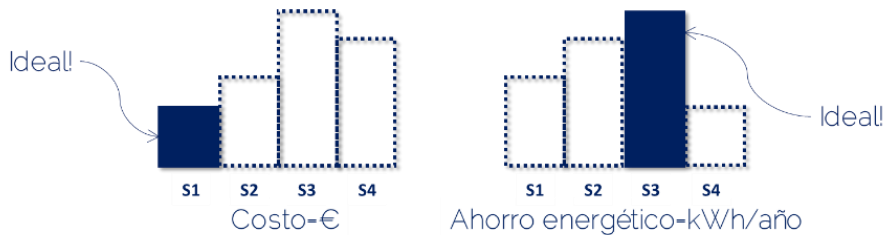


Figura. 30. Identificación de casos ideales en cada variable de acuerdo al campo. Fuente: Elaboración propia.

Los casos ideales sirven como base para comparar el resto de los casos y saber en qué medida éstos se *alejan* del objetivo, esta condición se expresa en la ecuación como $Z_1(x) - Z_1^*$ para el costo de rehabilitación y como $Z_2^* - Z_1(x)$ para el ahorro energético, por lo que los valores son absolutos y son

indicadores de evaluación de las variables de cada solución con respecto al caso ideal. La Figura. 31 muestra gráficamente la comparación en ambos casos.

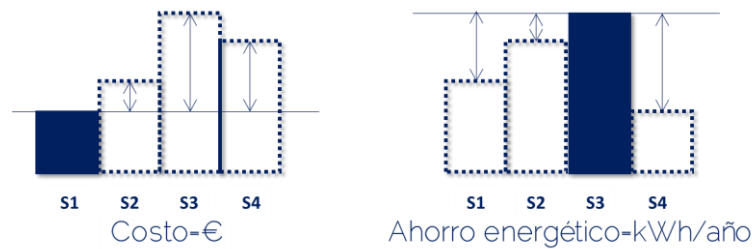


Figura. 31. Comparación de casos de estudio con casos ideales. Fuente: Elaboración propia.

A partir del modelo original de Asadi se realizaron modificaciones para aplicar la metodología a la investigación. El modelo aplicado se muestra en la siguiente ecuación, una modificación relevante fue la incorporación de una tercer variable al modelo al aplicar las constantes de un proyecto sustentable donde x representa el precio de cada solución, y representa el impacto ambiental y z representa la resistencia térmica que implica una mejora en el confort térmico interior; nótese que el valor λ fue anulado debido a que el peso o la importancia de los tres aspectos es equitativo dentro del desarrollo sustentable, dado que λ es la proporción de cada solución con respecto a 1. Ver Ecuación 2.

Ecuación 2

$$\begin{aligned} & \text{Min } \{a\} \\ & x \geq (Z_1(x) - Z_1^*) \\ & y \geq (Z_2(x) - Z_2^*) \\ & z \geq |Z_3^* - Z_2(x)| \\ & a \geq 0 \end{aligned}$$

Un aspecto más que se incorporó a la metodología fue la integración de los valores de cada solución para ser comparados a partir de misma escala, para esto, se parte de principios trigonométricos básicos. Se considera que el modelo aplicado tiene tres ejes correspondientes a las tres variables (x , y , z): resistencia térmica, precio e impacto ambiental.

Dado a que dentro de la metodología aplicada, los valores calculados para cada valor son siempre positivos, se usa una fórmula trigonométrica de Herón (Ecuación 4) para saber el área del triángulo que resulta al unir los puntos de cada valor en el eje correspondiente. Para poder resolver dicha fórmula es necesario conocer la hipotenusa entre dos ejes que se calcula con los valores de cada variable como catetos (x , y , z). Las tres hipotenusas h_1 , h_2 , h_3 (Ver Ecuación 3) representan los tres lados del triángulo que sirven

para resolver la fórmula de Herón y conocer el área (A) del triángulo que corresponde a una solución. Ver Figura. 32. Este proceso se realiza con todas las soluciones existentes por lo que las áreas correspondientes a cada solución pueden ser comparadas entre sí.

Ecuación 3. Cálculo de hipotenusas:

$$h_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$h_2 = \sqrt{y^2 + z^2}$$

$$h_3 = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Ecuación 4. Fórmula de Herón:

$$A = \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + h_3)(h_1 + h_2 - h_3)(h_2 + h_3 - h_1)(h_3 + h_1 - h_2)}}{4}$$

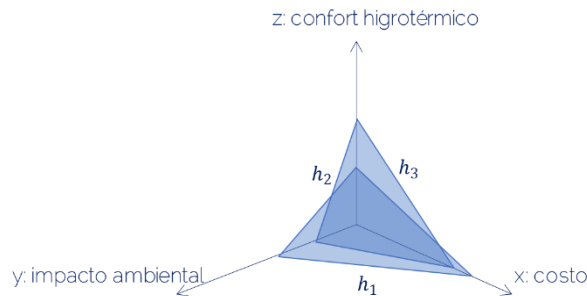


Figura. 32. Integración de los valores de cada solución a partir de principios trigonométricos. Fuente: Elaboración propia.

7.1.3 Selección de Aislantes para Envolvente:

En el Anexo 4 se muestran la información recopilada para los tipos de aislantes en suelos, muros y techos¹⁷ así como los cálculos realizados para la evaluación siguiendo la metodología descrita anteriormente. En la Tabla 17. Tabla 20 y

En el Anexo 6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar los aislantes correspondientes a cada caso. Los resultados se presentan con tres gráficas por usuario. La primera muestra las temperaturas anuales originales $To1$ con respecto a un rango de confort así como las temperaturas anuales una vez realizada la adecuación $To2$. Para el usuario $U1$ y $U2$, cuando la temperatura original se encontró dentro del rango de

¹⁷ La selección de materiales aislantes se acotó de acuerdo a la disponibilidad en la zona y a los resultados del informe *Uso de Aislamiento Térmico en la Vivienda* (Silva Conde, 2011)

confort y no fue necesaria ninguna adecuación, los puntos de $To1To2$ son iguales. En la segunda gráfica se muestra el incremento de temperatura anual como un porcentaje en relación a la To anual original por orientación y en la tercera gráfica se muestra el mismo incremento de temperatura con respecto al sistema constructivo, en esta última gráfica sólo se incluyen aquellos casos en los que se realizó la adecuación por lo que para el usuario $U1$ y $U2$ no se presentan los sistemas constructivos que no requirieron una adecuación.

Tabla 21 se encuentran los datos de resistencia térmica R (CIBSE, 2006), precio P (CYPE Ingenieros, 2013) y carbono incorporado EC (Hammond & Jones, 2011) considerados en cada solución para muros, suelos y techos respectivamente. Los valores resaltados en negritas indican la mejor solución en cada variable.

Tabla 17.
Características de Aislantes en Muros para Evaluación.

ID	Descripción	R (m ² K/W,)	P (\$)	EC (kgCO ₂ e/kg)
Am1	Sistema ETICS Traditem "GRUPO PUMA" de aislamiento exterior de fachadas.	1.10	627.98	2.50
Am2	Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas.	1.65	896.84	1.20
Am3	Sistema ETICS Wall-Term "REVETÓN" de aislamiento exterior de fachadas.	0.55	802.59	2.50
Am4	Aislamiento de frentes de las losas y columnas en fachada, con poliestireno extruido.	0.90	252.67	2.70
Am5	Sistema weber.therm Mineral "WEBER CEMARKSA" de aislamiento térmico y acabado mineral de fachadas.	1.10	289.54	1.20
Am6	Sistema Thermocal "DBBLOK" de aislamiento térmico y acabado mineral de fachadas.	1.10	406.30	1.20
Am7	Aislamiento de frentes de las losas y columnas en fachada, con poliestireno extruido.	1.22	321.79	2.70
Am8	Aislamiento en trasdosado directo de placas pegadas con cola.	1.45	181.20	2.70

Nota: Elaboración propia en base a (Hammond & Jones, 2011), (CIBSE, 2006), (CYPE Ingenieros, 2013)

Tabla 18.
Características de Aislantes en Suelos para Evaluación.

ID	Descripción	R (m ² K/W,)	P (\$)	EC (kgCO ₂ e/kg)
As1	Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales.	1.40	284.12	1.20
As2	Aislamiento de suelos flotantes con láminas de polietileno.	0.95	34.67	2.04
As3	Aislamiento de suelos flotantes con poliestireno expandido.	0.75	77.90	2.55
As4	Aislamiento de suelos flotantes con poliestireno extruido.	1.50	317.61	2.55

As5	Aislamiento de suelos flotantes con lana de madera.	0.56	380.69	0.98
As6	Aislamiento directo bajo suelos de madera y laminados con lanas minerales.	0.55	134.34	1.20

Nota: Elaboración propia en base a (Hammond & Jones, 2011), (CIBSE, 2006), (CYPE Ingenieros, 2013)

Tabla 19.

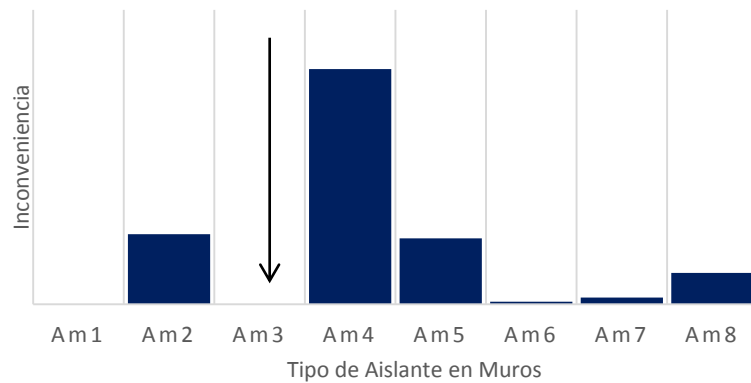
Características de Aislantes en Suelos para Evaluación.

ID	Descripción	R (m²K/W,)	P (\$)	EC (kgCO₂e/kg)
At1	Aislamiento exterior de techumbres inclinadas con poliuretano proyectado	1.25	395.58	3.48
At2	Aislamiento exterior de techumbres inclinadas con poliestireno expandido	1.50	166.16	2.55
At3	Aislamiento exterior de techumbres inclinadas con poliestireno extruido	1.30	338.95	2.70
At4	Aislamiento exterior de techumbres inclinadas con lana mineral	1.30	275.63	1.20
At5	Aislamiento tipo sándwich con madera	1.13	474.42	2.70
At6	Aislamiento tipo sándwich cerámico	1.00	123.75	2.55

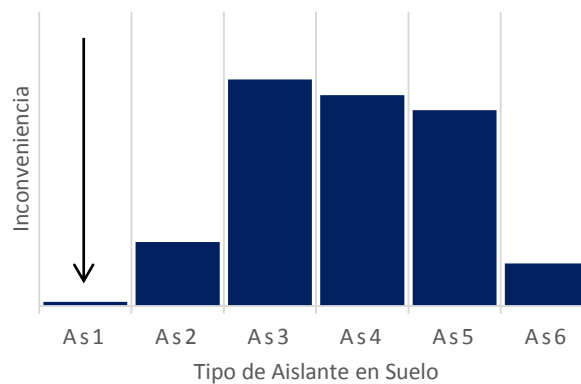
Nota: Elaboración propia en base a (Hammond & Jones, 2011), (CIBSE, 2006), (CYPE Ingenieros, 2013)

Las Gráfica 36, Gráfica 37 y Gráfica 38 muestran los resultados obtenidos de la evaluación para suelos As, muros Am y techos At respectivamente. En las gráficas los valores más altos corresponden a las peores opciones mientras que las opciones con valores que se acercan a cero son los que representan mayores ventajas para los objetivos de la investigación es decir, aquellas que tienen un precio más bajo, menor impacto ambiental y mayor resistencia térmica y por lo tanto menor beneficio para el confort térmico interior.

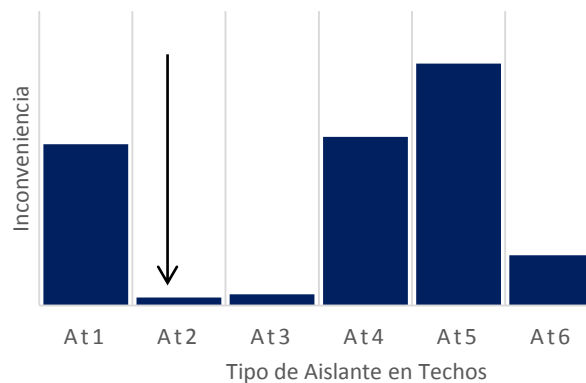
De acuerdo a la evaluación sustentable, las mejores soluciones de aislantes son el Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas para muros; el Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales para suelo y Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido para techos. El hecho de que los valores sean proporcionales y la escala se base en los casos de estudio como valor 0, garantiza una equidad en los resultados.



Gráfica 36. Área calculada por solución para muros, la mejor opción de aislante es un Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas o similar. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 37. Área calculada por solución para muros, la mejor opción evaluada es un Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 38. Área calculada por solución para techos, se acuerdo a la evaluación, la mejor opción es un Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar. Fuente: Elaboración propia.

Como se menciona en el caso práctico, las variables tuvieron el mismo peso, por lo que sólo se calculó el valor proporcional, sin embargo, siguiendo la metodología de Asadi, se puede agregar un valor λ que represente la importancia de cada variable dependiendo el caso, por ejemplo, el precio puede ser la variable más importante mientras que el impacto ambiental y la resistencia mantengan el mismo peso, en dicho caso,

la proporción podría ser propuesta como 0.6, 0.2, 0.2; 0.8, 0.1, 0.1, etc. Dependiendo el caso particular y los objetivos del proyecto y considerando siempre que la suma de λ será siempre igual a 1 o al 100%.

7.2 Muro Trombe

El calentamiento solar pasivo es un requerimiento que de acuerdo al análisis climático resulta primordial debido a las bajas temperaturas durante la mayor parte del año. De acuerdo a la literatura, el muro trombe debe estar orientado hacia el *S* para obtener la mejor eficiencia del sistema, sin embargo, dentro de la investigación evaluó el aporte del sistema en las orientaciones *E*, *O* y variantes (*SE* y *SO*).

Las características del diseño del muro trombe se realizó de acuerdo al documento *Thermal Storage Wall Design Manual* (Wilson, 1979) y se muestran en la Tabla 20.

El absorbedor debe ser una superficie que permita una transmitancia solar alta cuando se encuentre expuesta al sol y que presente bajas pérdidas de calor cuando la temperatura exterior sea menor que la interior. En la Figura 33 se muestra esquemáticamente el funcionamiento del sistema doble durante invierno y verano el cual de acuerdo a la literatura referida, es el más conveniente. Para el diseño del muro trombe de este estudio, se consideró un sistema de doble cristal claro de 3mm y con una cámara de aire de 6mm, el cual tiene un valor *U* de 2.199 W/m²K.

La masa térmica como su nombre lo indica, debe retener la mayor cantidad de calor posible recibido del absorbedor por lo que no sólo la superficie expuesta es importante, sino también su espesor ya que perjudicará la capacidad de calor interno. El material también debe contar con una alta conductividad térmica, si la conductividad es demasiado baja (como la madera), el calor no puede pasar fácilmente a través del material, incluso si ese material puede almacenar una gran cantidad de calor (alta capacidad calorífica). Si la pared es demasiado gruesa, el calor no será capaz de moverse a través de ella fácilmente. Si un material tiene alta conductividad, el calor se mueve a través de él con facilidad y una pared más gruesa será también más eficaz.

Tabla 20.

Diseño de Muro Trombe para el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Componente	Propiedades físicas	Propiedades térmicas
Abertura y absorbedor.	Sistema de doble cristal claro y cámara de aire.	Valor <i>U</i> =2.199 W/m ² K
Masa térmica.	Muro negro de tabique (e=150mm)	Valor <i>U</i> =2.482 W/m ² K
Distribución.	Separación entre absorbedor y masa térmica e=10cm	

Control

A=2% del área de masa térmica. El horario de operación debe ser diurno y solamente durante los meses de invierno o los que requieran calentamiento.

Nota: Fuente: Elaboración propia.

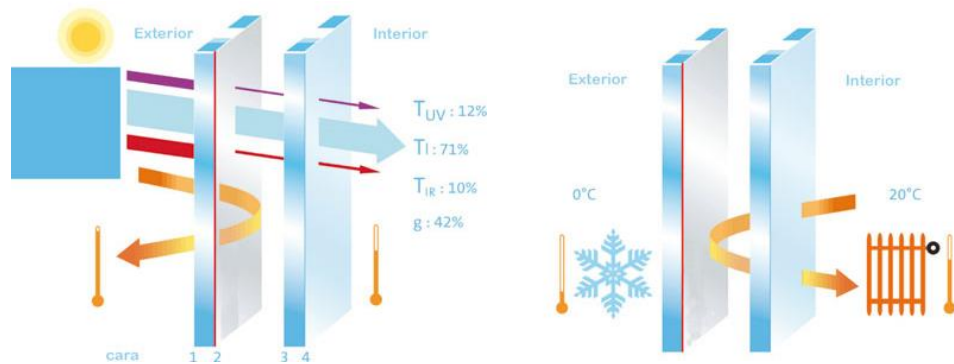
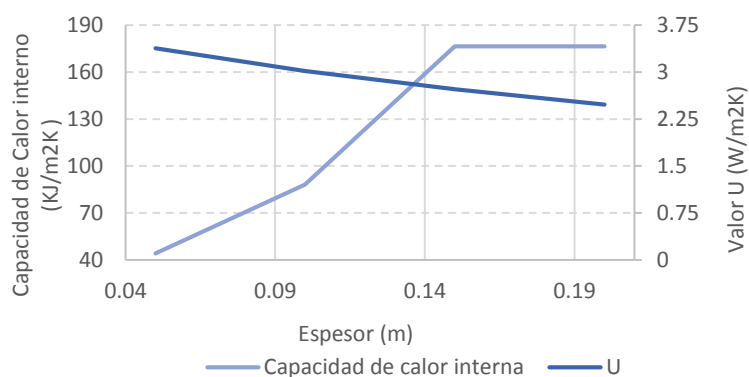


Figura33. Esquema de sistema de doble cristal en invierno y verano. Fuente: SGG Planitherm 4S.

Para el diseño del muro trombe, se seleccionó un muro negro de concreto con una conductividad de $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$; en la Gráfica 39 se muestra la relación entre la capacidad de calor interno, el valor U y el espesor del muro concreto, como se puede observar, el valor U es inversamente proporcional al espesor en una relación casi equitativa; la capacidad de calor interno es inversamente proporcional al espesor del muro logrando su valor máximo de $176.4 \text{ KJ/m}^2\text{K}$ con un espesor de 150 mm , a partir de dicho espesor, el valor de la capacidad de calor interno se mantiene estable.

Para el diseño de la distribución o la separación entre el absorbedor y la distribución se considera la recomendación de Wilson de $3 \frac{1}{2}$ pulgadas entre el cristal y el muro masivo ya que permite la circulación de aire y evita pérdidas de calor almacenado en el muro masivo.

Las dos aberturas para el control del aire se diseñaron de acuerdo al Dr. J. D. Balcomb de *the Solar Division of Los Alamos Scientific Laboratories* con una superficie del 2% de la superficie total del muro en los extremos inferior y superior del muro masivo, dichas aberturas se diseñaron en los extremos superior e inferior del muro para lograr la circulación del aire por cambio de temperatura. El control de las temperaturas se programó para mantenerse abiertas durante los meses de invierno durante las horas diurnas y cerradas durante el resto del año como se muestra en el Anexo 5.



Gráfica 39. Capacidad de Calor interno y valor U de acuerdo al espesor del muro de concreto. Fuente: Elaboración propia en base al Programa *DesignBuilder*.

7.3 Protección Solar

En el apartado de Asoleamiento se presentan los datos horarios para temperatura exterior y radiación; la carta estereográfica con el movimiento del sol a lo largo del año para el sitio de estudio y las temperaturas exteriores en relación con la posición solar. En el análisis se observa que existe una temporada marcada de sobrecalentamiento que comprende las tardes de marzo a junio por lo que la tercera adecuación propuesta en la presente investigación es la protección solar para evitar temperaturas elevadas al interior que no cumplan con el rango de confort establecido.

Para definir las características de los protectores solares en las orientaciones de estudio se usó como herramienta la carta estereográfica mencionada anteriormente y un transportador estereográfico solar para la latitud 19°35' N. La Figura 34 muestra las recomendaciones generales de los dispositivos más eficientes de acuerdo a la orientación de la fachada, es decir, de acuerdo a la posición solar con respecto a la ventana para la latitud de la ciudad de México.

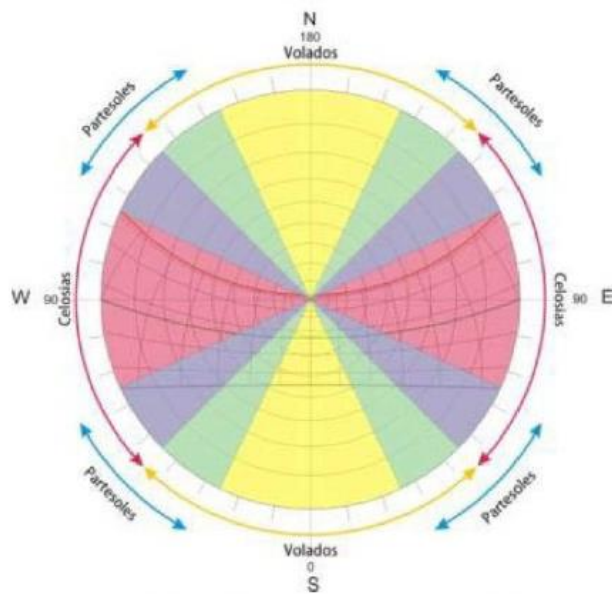


Figura 34. Recomendación de dispositivos de control solar por orientación. Fuente: (Guga, s.f.)

Una vez identificados los casos en los que se debe priorizar la protección solar se analizaron las sombras proyectadas durante las horas de sobrecalentamiento en el mes de abril; el transportador de sombras con la cobertura necesaria para evitar la radiación solar durante las horas de sobrecalentamiento¹⁸ y el dispositivo para las condicionantes establecidas en el transportador de sombras.

Orientación sur: O1

En la Figura35 se muestra al análisis de asoleamiento para la orientación S así como el dispositivo de protección solar con elementos verticales para proteger la radiación solar directa proveniente del oeste.

Orientación suroeste: O2

En la Figura se muestra al análisis de asoleamiento para la orientación SO así como el dispositivo de protección solar que incluye elementos verticales y horizontales.

Orientación oeste: O3

En la Figura36 se muestra al análisis de asoleamiento para la orientación O así como el dispositivo de protección solar diseñado para cubrir la radiación directa durante las horas de temperatura exterior de sobrecalentamiento.

Orientación Este: O5

¹⁸ Para fines prácticos, en las cartas estereográficas sólo se resaltan las horas de sobrecalentamiento. De acuerdo a las temperaturas horarias del Análisis climático del sitio.

En la Figura38se muestra al análisis de asoleamiento para la orientación *E* así como el dispositivo de protección solar diseñado para cubrir la radiación directa proveniente del *S*.

Orientación Sureste O6

Como último caso se presenta la orientación *SE*, en la Figura39se muestra al análisis de asoleamiento así como el dispositivo de protección solar diseñado para cubrir la radiación directa proveniente del *S* y *SO*.

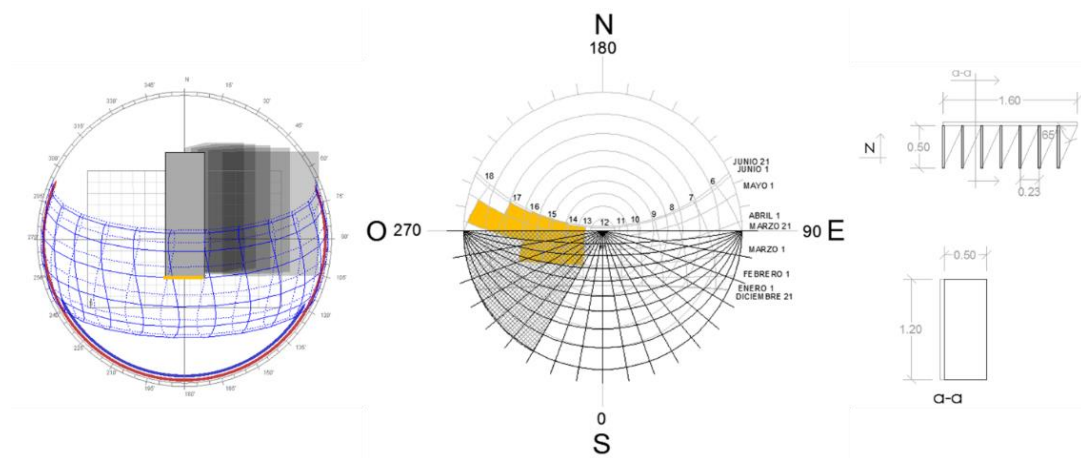


Figura35. Dispositivo de Control Solar para orientación sur. Fuente: Elaboración propia.

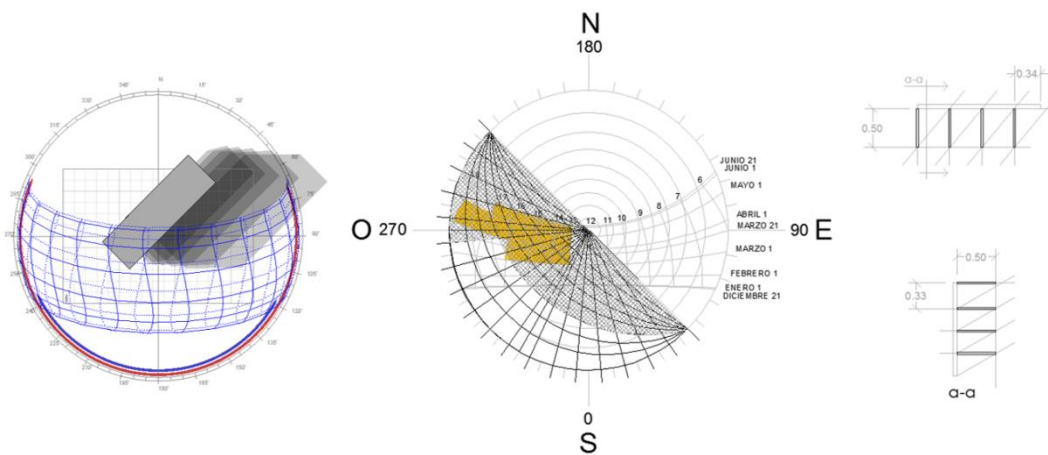


Figura36. Dispositivo de control solar para la orientación suroeste. Fuente: Elaboración propia.

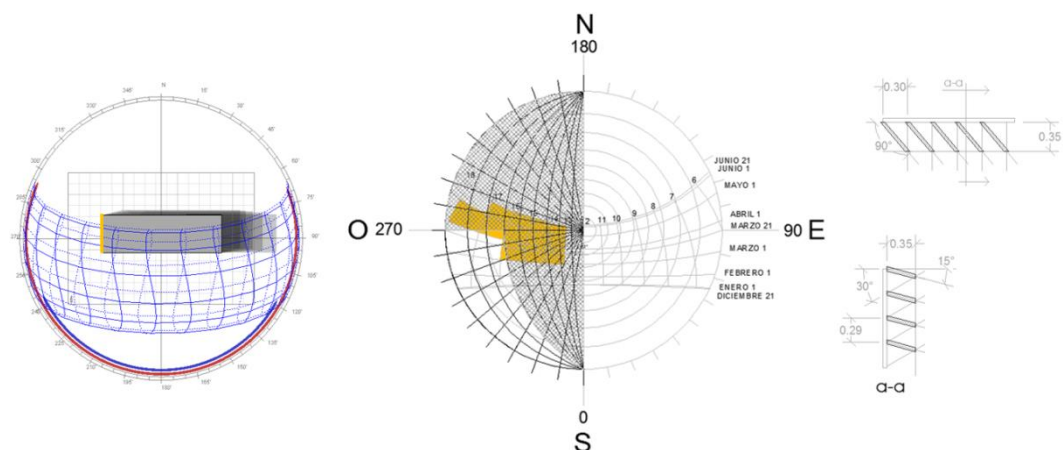


Figura37. Dispositivo de control solar para la orientación suroeste. Fuente: Elaboración propia.

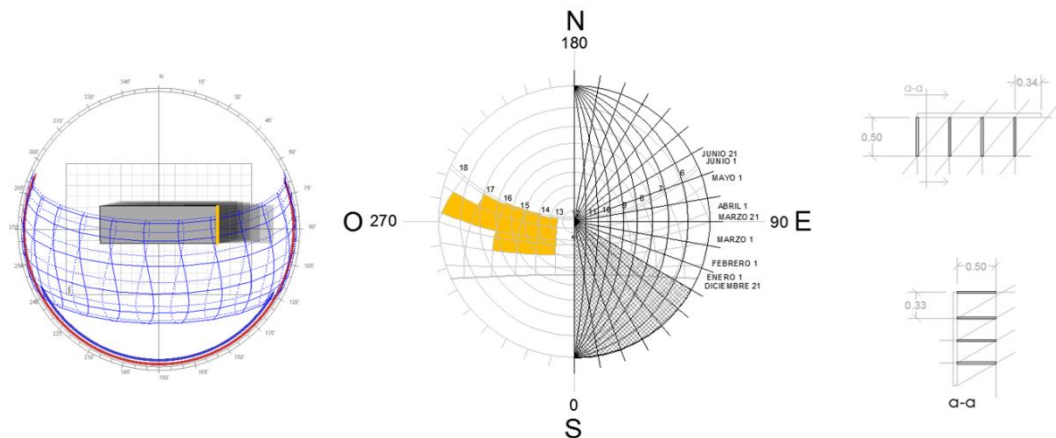


Figura38. Dispositivo de control solar para la orientación este. Fuente: Elaboración propia.

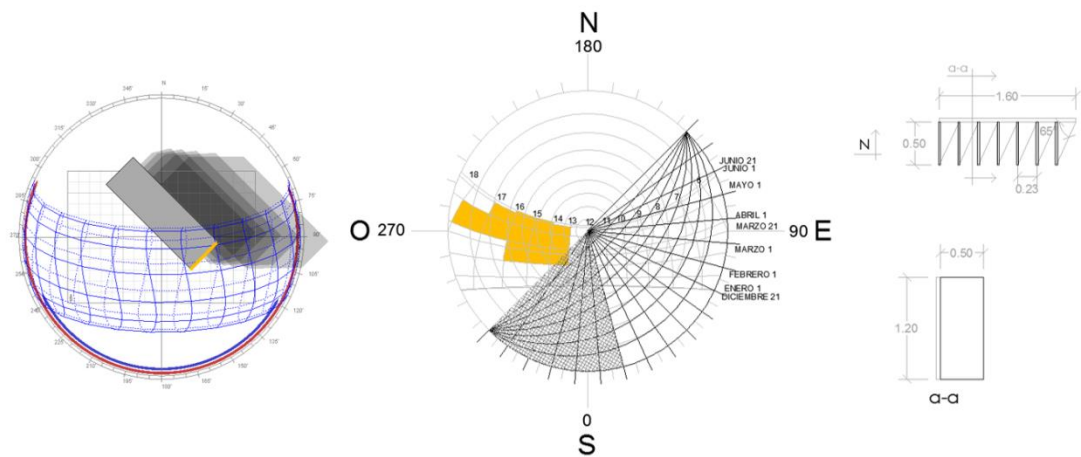


Figura39. Dispositivo de control solar para la orientación este. Fuente: Elaboración propia.

7.4 Conclusión Capitular

En el séptimo capítulo se expuso la aplicación de la metodología de Asadi para la comparación de aislantes para techos y muros tuvo un objetivo similar al original, cambiando las variables de evaluación a impacto ambiental, precio y resistencia térmica. El modelo matemático final utiliza ecuaciones algebraicas simples y flexibles por lo que puede ser aplicado en prácticamente cualquier caso que busque evaluar casos con variables que presenten diferentes unidades.

Para las propuestas del sistema de Muro Trombe en fachada, se siguió la metodología de Wilson para establecer parámetros de características termo físicas para la zona de estudio como valores U, dimensiones y programación de uso. Por último, se definieron las características de los dispositivos de control solar de acuerdo al análisis de temperaturas, radiación y asoleamiento presentado en el análisis climático. En este capítulo, se presentaron las características generales que teóricamente deben tener las adecuaciones para cumplir los requerimientos especificados en el capítulo *Evaluación del Universo de Estudio*. La eficiencia de dichas soluciones se expresarán de forma cuantitativa a partir de la simulación numérica de los casos de estudio.

8. Evaluación de Soluciones Constructivas.

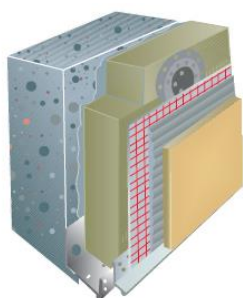
8.1 Aislamiento en Envolvente.

En el capítulo *Diseño de Soluciones Constructivas*, se identificaron los aislantes más convenientes para techos, suelos sobre terreno y muros exteriores de acuerdo a su resistencia térmica, precio y carbono incorporado, en la Figura 40 se muestran las aplicaciones de los aislantes para suelos muros y techos y en la

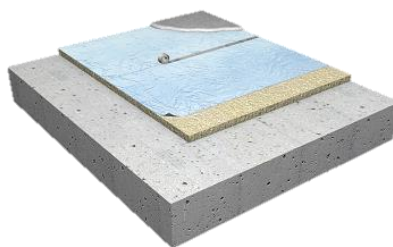
En el Anexo 6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar los aislantes correspondientes a cada caso. Los resultados se presentan con tres gráficas *por usuario*. La primera muestra las temperaturas anuales originales $To1$ con respecto a un rango de confort así como las temperaturas anuales una vez realizada la adecuación $To2$. Para el usuario $U1$ y $U2$, cuando la temperatura original se encontró dentro del rango de confort y no fue necesaria ninguna adecuación, los puntos de $To1To2$ son iguales. En la segunda gráfica se muestra el incremento de temperatura anual como un porcentaje en relación a la To anual original por orientación y en la tercera gráfica se muestra el mismo incremento de temperatura con respecto al sistema constructivo, en esta última gráfica sólo se incluyen aquellos casos en los que se realizó la adecuación por lo que para el usuario $U1$ y $U2$ no se presentan los sistemas constructivos que no requirieron una adecuación.

Tabla 21 se muestran las características termodinámicas de dichos aislantes así como el valor U para cada sistema constructivo antes y después de la integración. En la sección *Cálculo de Balance Térmico*, se expusieron las pérdidas y ganancias de calor de los elementos que componen la vivienda; en esta sección, se expondrán los resultados obtenidos en base a la simulación de los casos de estudio.

Una vez identificados los elementos constructivos que deben aislarse en cada caso (ver Tabla 15) se retoman los aislantes propuestos en la sección *Aislamiento en Envolvente*, para poder realizar propuestas de adecuación las cuales se muestran gráficamente en la Figura 41, como se puede observar, existen seis combinaciones que incluyen el aislamiento de uno dos y tres elementos constructivos la cual dependerá de los requerimientos térmicos y condiciones específicas de cada caso.



Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas.



Aislamiento de suelos flotantes con láminas de polietileno.



Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido.

Figura40. Aplicación de aislantes en suelos, muros y techos. Fuente: Uso de Aislamiento en Vivienda (AEAEE), 2011)

En el Anexo 6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar los aislantes correspondientes a cada caso. Los resultados se presentan con tres gráficas por usuario. La primera muestra las temperaturas anuales originales $To1$ con respecto a un rango de confort así como las temperaturas anuales una vez realizada la adecuación $To2$. Para el usuario $U1$ y $U2$, cuando la temperatura original se encontró dentro del rango de confort y no fue necesaria ninguna adecuación, los puntos de $To1To2$ son iguales. En la segunda gráfica se muestra el incremento de temperatura anual como un porcentaje en relación a la To anual original por orientación y en la tercera gráfica se muestra el mismo incremento de temperatura con respecto al sistema constructivo, en esta última gráfica sólo se incluyen aquellos casos en los que se realizó la adecuación por lo que para el usuario $U1$ y $U2$ no se presentan los sistemas constructivos que no requirieron una adecuación.

Tabla 21.

Propiedades termodinámicas de los materiales aislantes propuestos como adecuación a sistemas constructivos.

Aislante	Conductiv. W/mK	Calor Especifico J/kgK	Densidad Kg/m ³	Sistema	Valor U_1 W/M ² k	Valor U_2 W/M ² k
Aislamiento de suelos flotantes con láminas de polietileno.	0.38	840	140	S	2.565	.331
Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas.	0.04	1400	15	M1	2.658	.612
				M2	2.252	.591
				M3	4.167	.671
				L1	3.983	.323
Aislamiento exterior de techumbres inclinadas con poliestireno expandido.	0.35	1000	25	L2	3.556	.319
				L3	1.585	.239

Nota: Fuente: Elaboración propia en base a datos

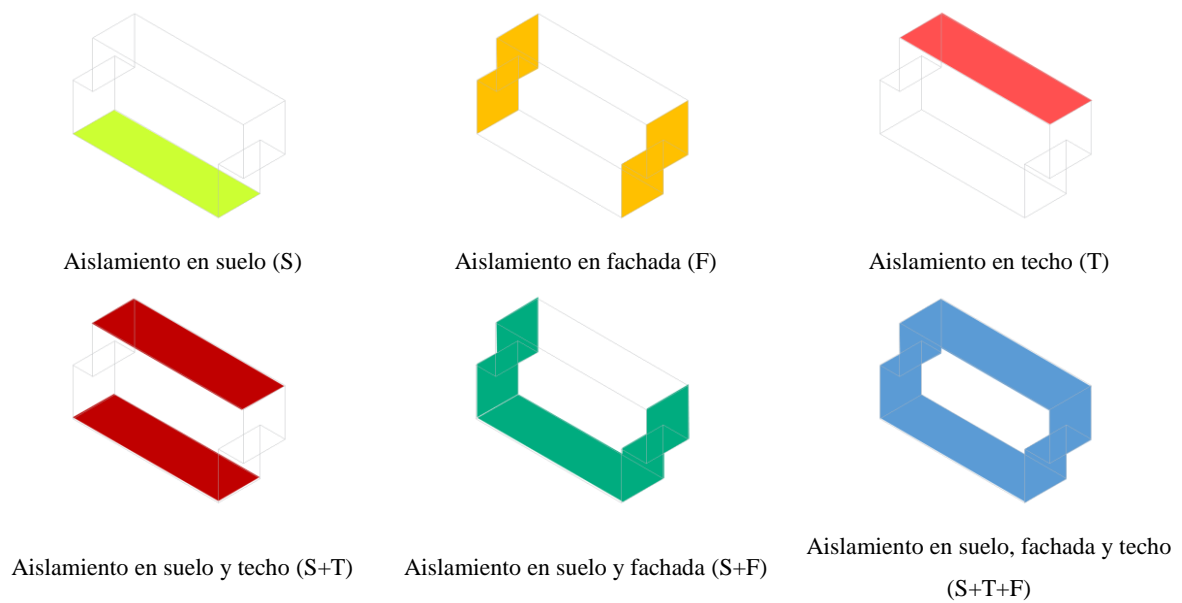
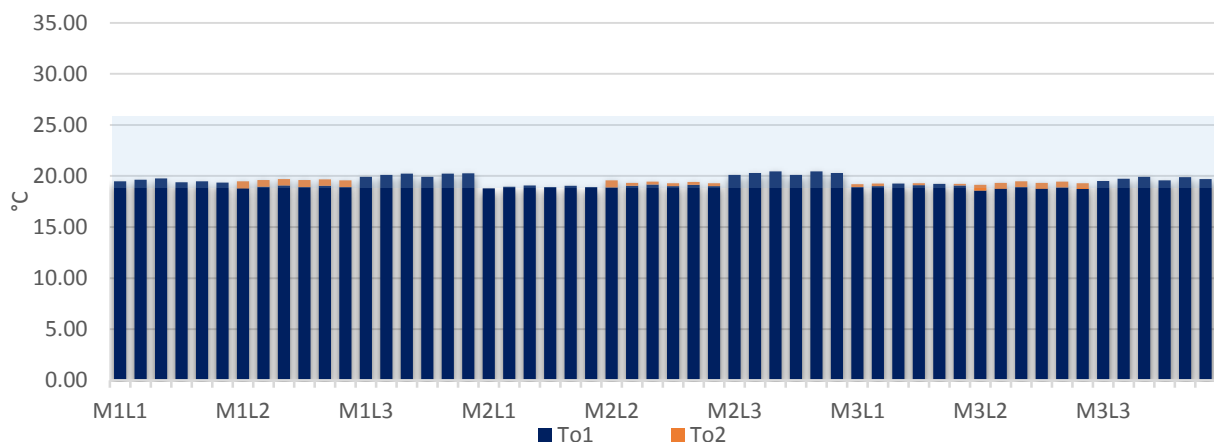


Figura41. Implementación de aislantes en elementos constructivos. Fuente: Elaboración propia.

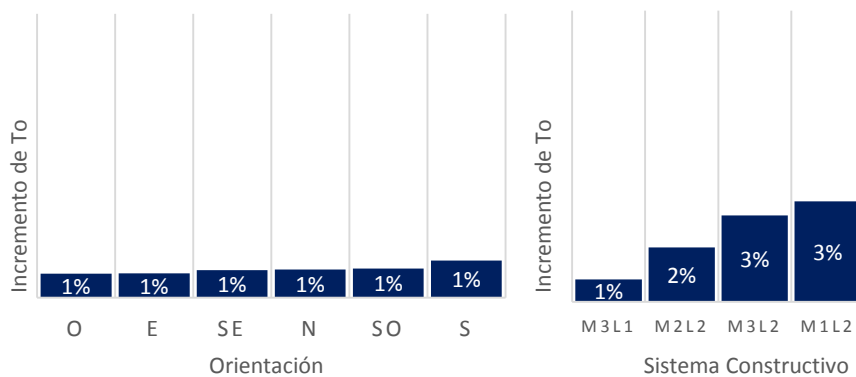
En el análisis térmico presentan To anuales diarias para las semanas de diseño de invierno y verano para corroborar los resultados obtenidos en las condiciones extremas de la vivienda (semana de diseño de invierno y verano). Los casos seleccionados fueron aquellos que lograron alcanzar el rango mínimo de confort térmico con la To más baja en cada grupo de usuario.

8.1.1 Resultados para Usuario U1

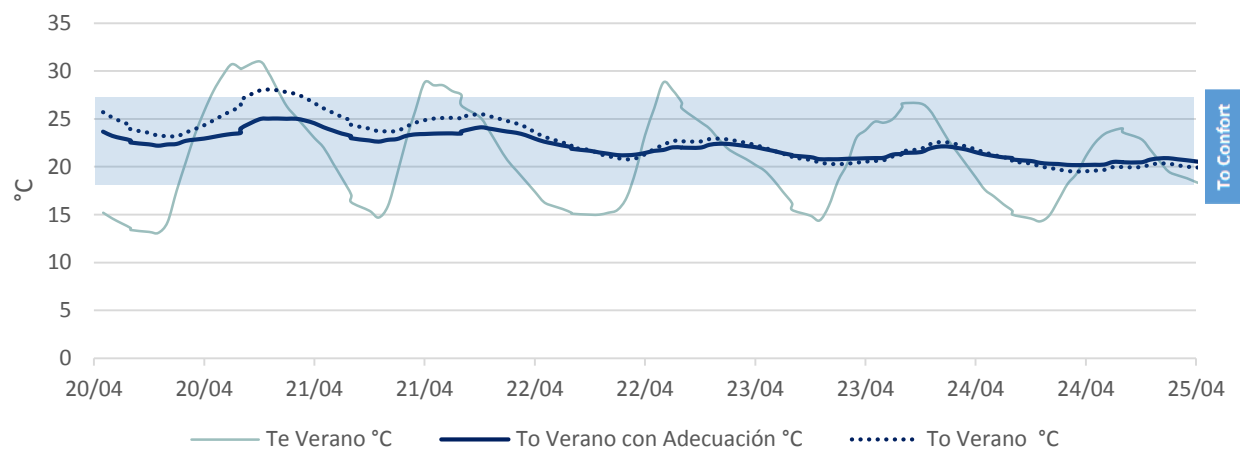
Para los casos con usuario *U1* (Gráfica 40), las adecuaciones se realizaron principalmente en los sistemas constructivos con losas *L2* (Losa de concreto armado con Loseta Vidriada) presentando ganancias térmicas favorables para todos los casos, principalmente para los sistemas con muro *M1* (Muro de block de 10cm) y *M3* (Muro de concreto armado de 10 cm), en las viviendas con sistemas constructivos con muros *M2* (Muro de block de 13cm) las ganancias fueron menores ya que las To originales eran mayores que en los dos casos anteriores. El incremento de temperatura no supera 1°C en relación a la orientación en ningún caso para este caso como se puede observar en la Gráfica 41; en relación al sistema constructivo, los casos con losa *L2* (Concreto armado con loseta vidriada) son los que presentan un mayor incremento de temperatura aunque la diferencia no rebasa el 2%.



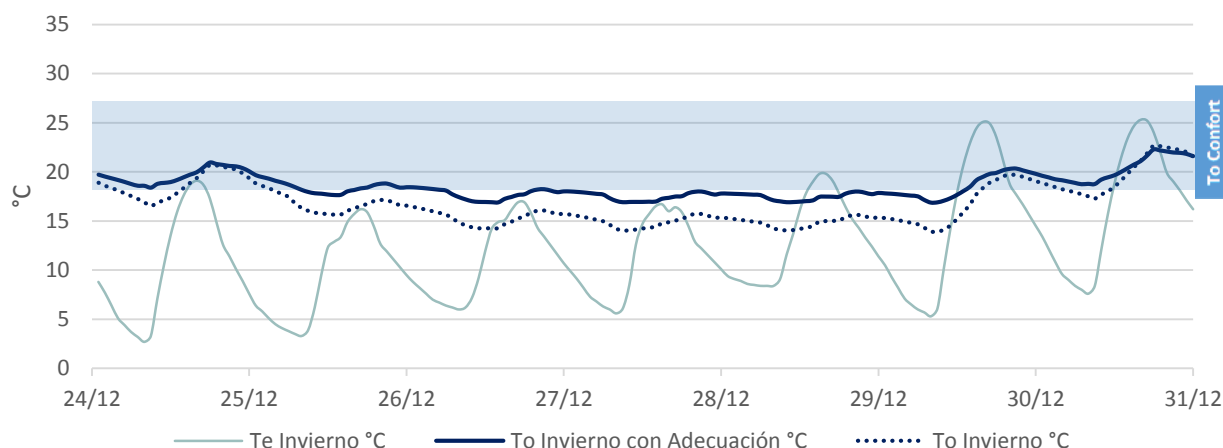
Gráfica 40. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 41. Incremento de temperatura (%) en casos de estudio con usuario U1 al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 42. Semana de Diseño en Verano UIM3L2O1. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 43. Semana de Diseño en Invierno *UIM3L2O1*. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 42 se muestran datos diarios para el caso *M3L2O1* (Muro de concreto armado con losa de concreto armado con loseta vidriada y orientación *S*) el cual presentó la *To* anual más baja una vez implementada la adecuación, (19.14°C). Durante la semana de verano se presentaban *To* al interior tanto de sobrecalentamiento como de enfriamiento al oscilar desde los 18°C hasta los 27°C ¹⁹. Una vez implementada la adecuación, las *To* máxima es de 25° mientras que la más baja es de 19°C por lo que la mayoría del tiempo, la temperatura se mantiene dentro del rango de confort.

Durante la semana de invierno (Gráfica 43), la *To* original presentó temperaturas por debajo del confort en la mayoría de las horas con temperaturas de hasta 14°C ²⁰; una vez integrado el aislamiento, las *To* no llegan al rango de confort durante la mayoría de la semana, sin embargo, hay un aumento de temperatura de más de 2°C .

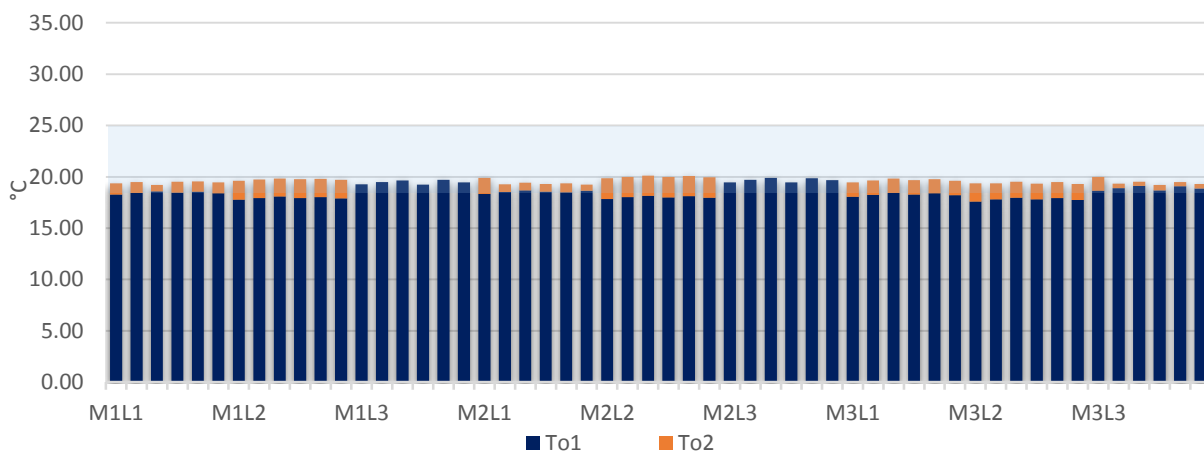
8.1.2 Resultados para Usuario *U2*

En el caso del usuario *U2*, (Gráfica 44) se logra un incremento de temperatura que suficiente para alcanzar el rango de confort térmico en todos los casos. En la Gráfica 45 se puede observar que el aporte térmico del aislamiento varía por orientación 2%, mientras que por sistema constructivo existe una variación de un 8%. Para este usuario, los casos con losas *L2* (Concreto armado con loseta vidriada), son los que temperaturas anuales más bajas, después de la adecuación hubo un incremento de temperatura promedio anual de hasta un 11%. La losa *L1* (Concreto armado con impermeabilizante) presentó un incremento de un 5 a un 8% y la losa *L3* (Vigueta y Bovedilla) tuvo un incremento promedio del 3%.

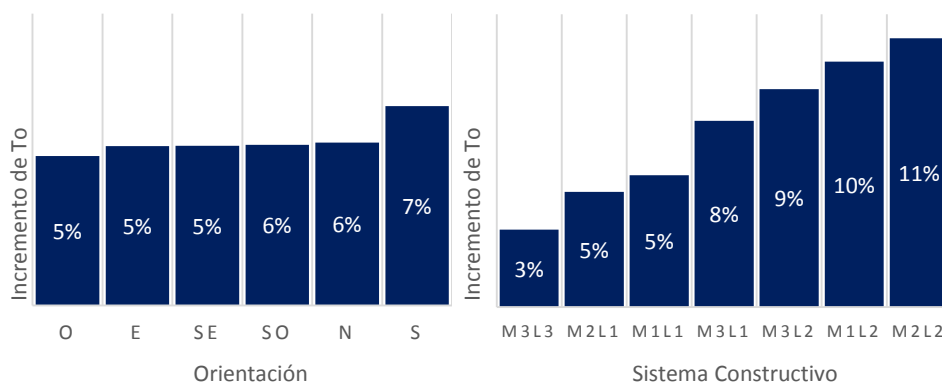
¹⁹ Datos redondeados.

²⁰ Datos redondeados.

La Gráfica 46 muestra los datos diarios para el caso *M3L3O4* (Muro de concreto armado con losa de concreto armado con losa de viga y bovedilla y orientación *O*) el cual presentó la *To* anual más baja una vez implementada la adecuación, (19.20°C). Durante la semana de verano se presentó una *To* al interior tanto de sobrecalentamiento como de enfriamiento al oscilar desde los 17°C hasta los 28°C ²¹. Una vez implementada la adecuación, las *To* máxima se mantiene en 28°C mientras que la más baja aumenta a 21°C por lo que la mayoría del tiempo, la temperatura se mantiene dentro del rango de confort.

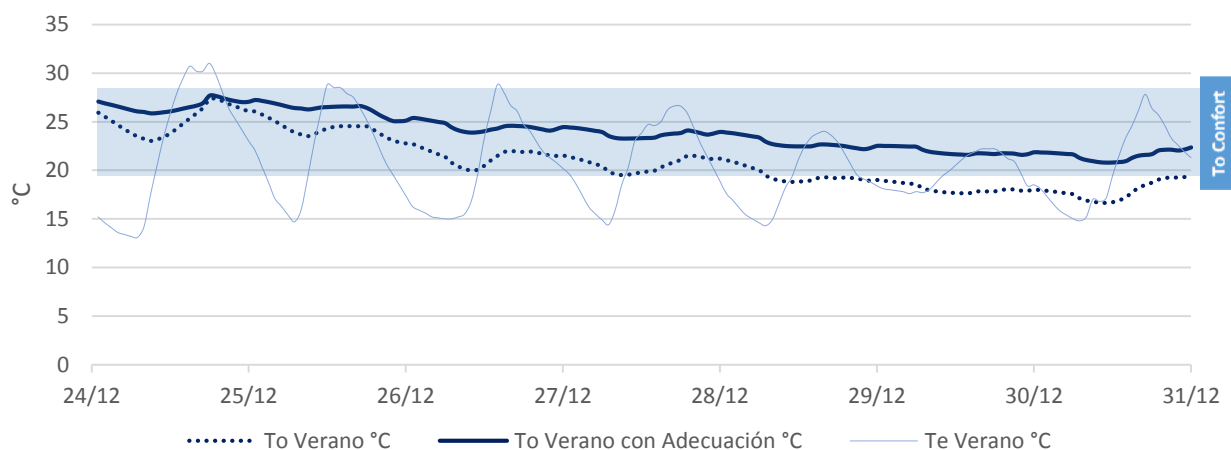


Gráfica 44. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario *U2*. Fuente: Elaboración propia.

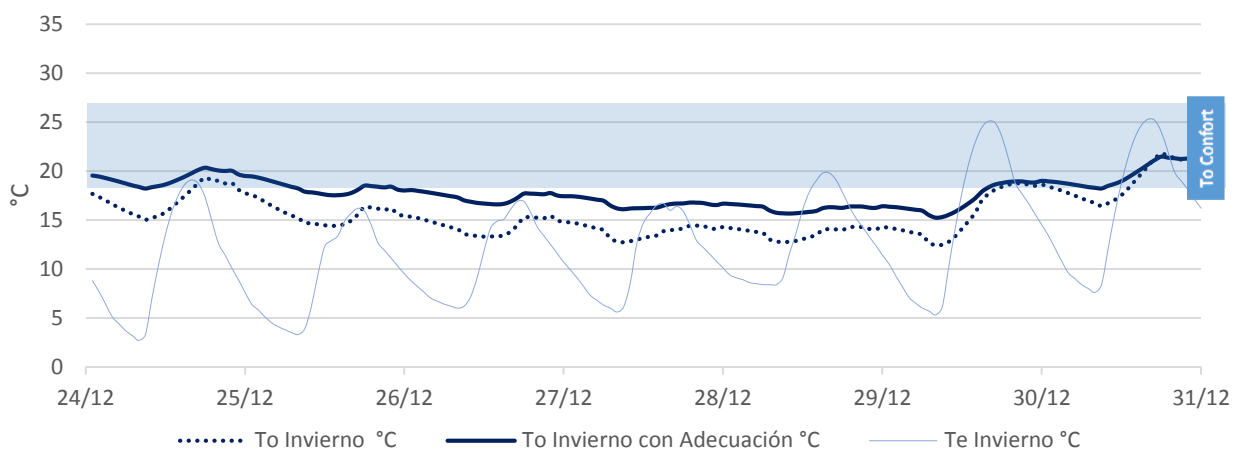


Gráfica 45. Incremento de temperatura en casos de estudio con usuario *U2* al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.

²¹ Datos redondeados.



Gráfica 46. Semana de Verano *U2M3L3O4*. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 47. Semana de Invierno *U2M3L3O4*. Fuente: Elaboración propia.

Durante la semana de invierno (Gráfica 47), la *To* original presentó temperaturas por debajo del confort en la mayoría de las horas con temperaturas de hasta 12°C^{22} ; una vez integrado el aislamiento, las *To* no llegan al rango de confort durante la mayoría de la semana, sin embargo, hay un aumento de temperatura de más de 2°C .

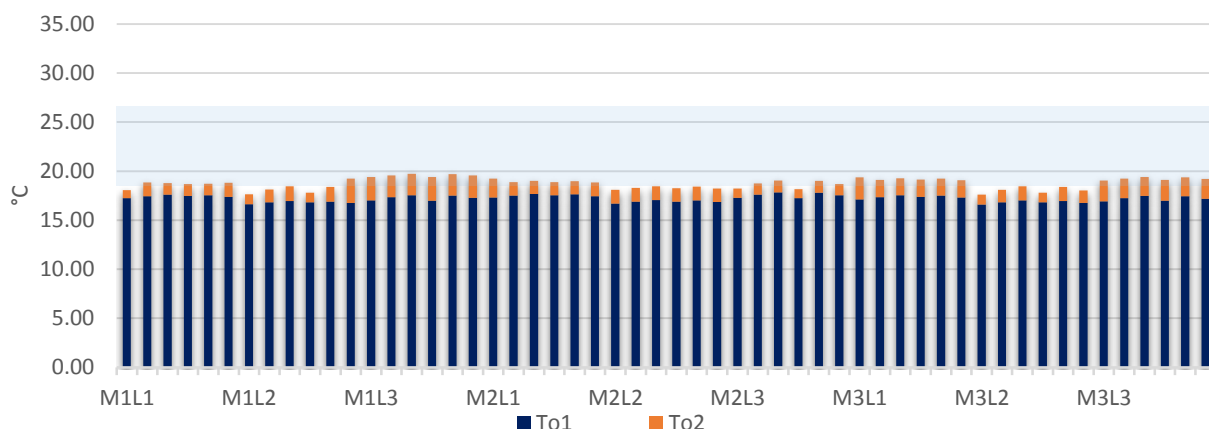
8.1.3 Resultados para Usuario *U3*

Para los casos con usuario *U3*, (Gráfica 44) se logra un aumento de temperatura mayor que los dos casos anteriores, sin embargo no es suficiente para alcanzar el rango mínimo de confort en la mayoría de los casos. Las viviendas con losas *L3* (Vigueta y bovedilla) logran condiciones térmicas dentro de confort

²² Datos redondeados.

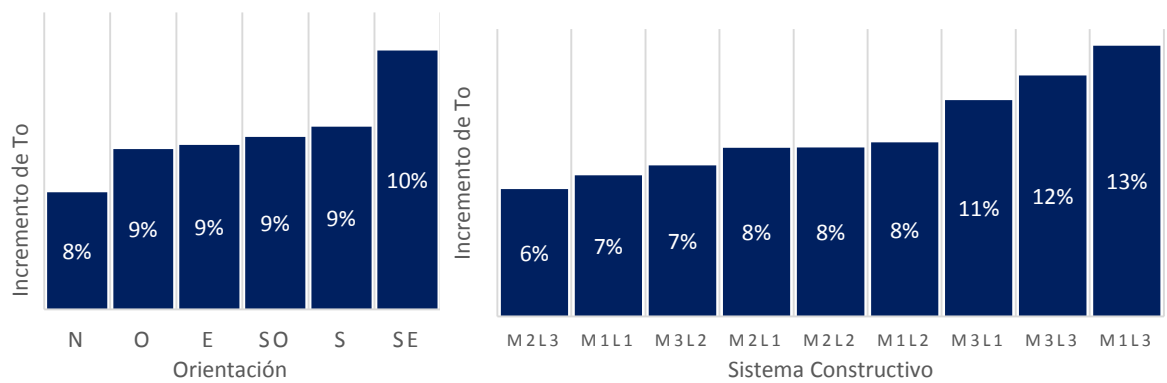
con muros *M1* y *M3*; de igual manera, los casos con sistema constructivo *M3L1* (Muro de concreto armado con losa de concreto armado e impermeabilizante), estos tres tipos de sistemas constructivos son los que presentaron una ganancia térmica por cubiertas por lo que al aislar tanto muros como suelos sobre terreno se logró aumentar la *To* de 11% a un 13% dependiendo el caso Gráfica 49.

La Gráfica 50 se muestra los datos horarios para el caso *M3L1O6* (Muro de concreto armado con losa de concreto armado con impermeabilizante y orientación *SE*) el cual presentó la *To* anual más baja una vez implementada la adecuación, (18.09°C). Durante la semana de verano se presentó una *To* al interior dentro de confort en la mayoría de las horas y de bajo calentamiento con una temperatura mínima de 17 °C²³. Una vez implementada la adecuación, las *To* se mantiene en confort durante toda la semana con una *To* mínima de 21°C.

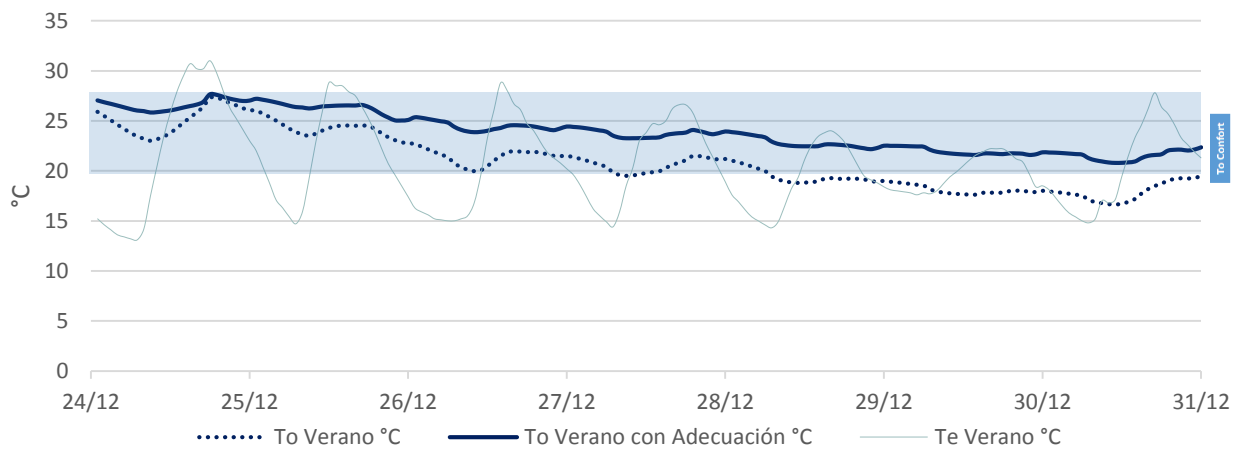


Gráfica 48. Temperaturas operativas anuales por caso de estudio antes y después de implementar propuestas de aislamiento para el usuario U3. Fuente: Elaboración propia.

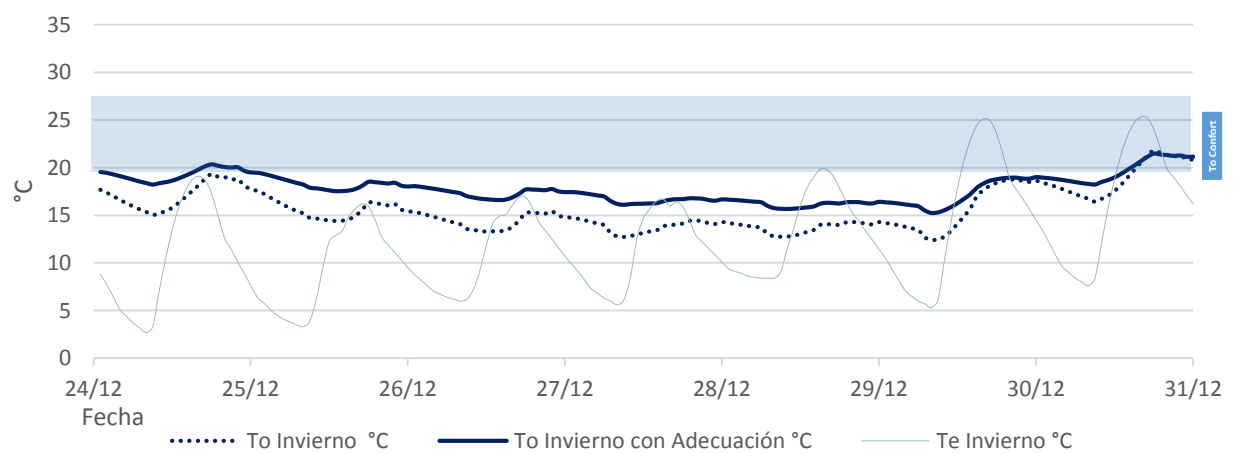
²³ Datos redondeados.



Gráfica 49. Incremento de temperatura en casos de estudio con usuario U3 al aplicar propuestas de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 50. Semana de Diseño en Verano *U3M3L1O6*. Fuente: Elaboración propia.



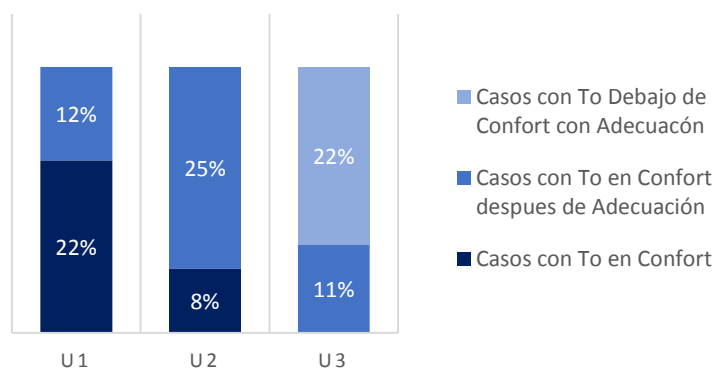
Gráfica 51. Semana de Diseño en Invierno *U3M3L1O6*. Fuente: Elaboración propia.

Durante la semana de invierno (Gráfica 51), la T_o original presentó temperaturas por debajo del confort en la mayoría de las horas con temperaturas de hasta 12°C^{24} ; una vez integrado el aislamiento, las T_o no llegan al rango de confort durante la mayoría de la semana, sin embargo, hay un aumento de temperatura de más de 2°C .

Como se pudo observar, los beneficios térmicos dependen del tipo de usuario en gran medida donde para las viviendas con usuario $U1$ se puede lograr temperaturas de confort al interior en todos los casos a partir del aislamiento de un elemento constructivo; para los casos con $U2$, se logran temperaturas de confort al aislar uno o dos elementos constructivos mientras que para el usuario $U3$ la mayoría de los casos requieren el aislamiento de dos o hasta tres elementos constructivos y no siempre se logran temperaturas de confort.

8.2 Muro Trombe

Las viviendas con usuario $U3$ con un integrante por vivienda, muestran en su mayoría temperaturas anuales al interior debajo del rango de confort térmico aún con la implementación de aislantes en la envolvente Gráfica, es por esto que se propone la integración de un muro trombe dando prioridad a una recámara como el espacio más habitable de la vivienda, para esto fue necesaria una evaluación térmica particular del espacio el cual se muestra a continuación.



Gráfica 52. Resultados generales después reducir el flujo de calor por conducción para disminuir las pérdidas de calor. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de muro trombe MT tiene su mayor eficiencia en la orientación sur mientras en la norte puede resultar contraproducente para el calentamiento de espacios (Wilson, 1979) ya que puede disminuir la temperatura interior del espacio al que se integre. Dadas estas condiciones, se evaluará la integración del

²⁴ Datos redondeados.

MT para la Recámara 1, ya que dentro de las orientaciones de estudio, ésta recámara tiene orientaciones de *E* a *O* con variaciones a cada 45°. Figura 43²⁵.

El diseño de muro trombe se desarrolló en la sección 7.2 *Muro Trombe*. Para poder conocer el efecto del sistema en los casos de estudio, y la derivación que resulta al modificar la orientación de la vivienda se realizaron modificaciones al modelo de simulación en la fachada de la recámara. En la Figura42se muestra la propuesta de ubicación del muro trombe.

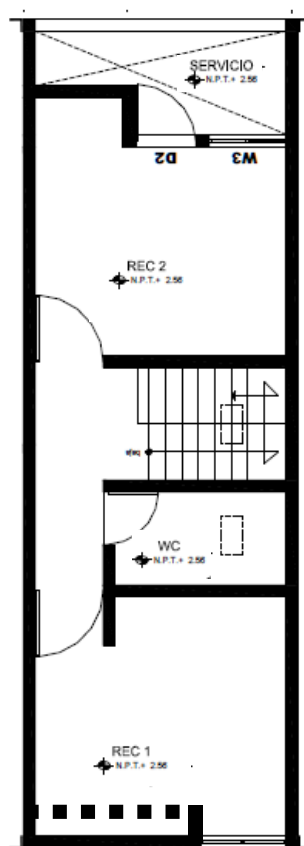


Figura42. Ubicación del muro trombe en Recámara 1 para las orientaciones *S*, *SE*, *E* y *O* *SO*. Fuente: Elaboración propia en base a Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climas de México (Valerdi, 2011)

En el Anexo 2 se muestran las *To* al interior de la Recámara 1 (*O1*, *O2*, *O3*, *O5* y *O6*) y Recámara 2 (*O4*) después de incorporar el *MT* en la fachada²⁶*To2*. En la Gráfica 53 se muestran los datos de temperaturas

²⁵ La orientación *N* no está incluida debido a las bajas ganancias por radiación en dicha orientación, en este caso, se recomienda la integración del muro trombe en la fachada de la Recámara 2 con orientación *S*.

²⁶ Los casos indicados en el Anexo 2 que no requieren un aumento en la *To* fueron omitidos.

originales ($To1$) y temperaturas con la incorporación muro trombe ($To2$) durante el mes de enero con un rango de confort, indicado con sombreado azul, de 18.14°C como límite inferior y 25.4°C como límite superior para el 80% de aceptación de acuerdo al *Cálculo de Confort Térmico para el NZMCM* (Gráfica 3). Al igual que en gráficas anteriores, el eje horizontal indica *grupos* de sistemas constructivos y cada uno incluye las cinco orientaciones evaluadas.

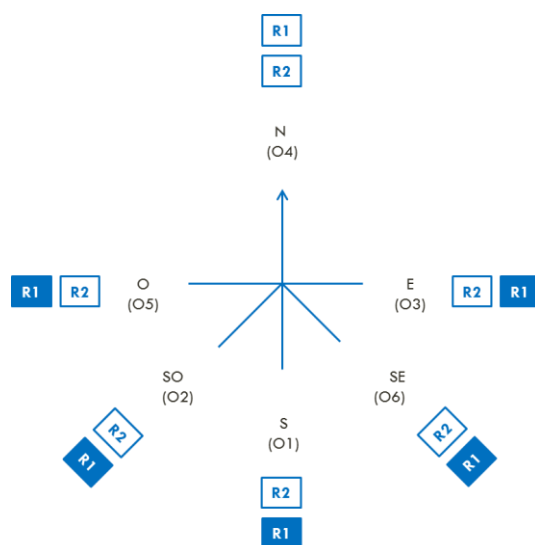


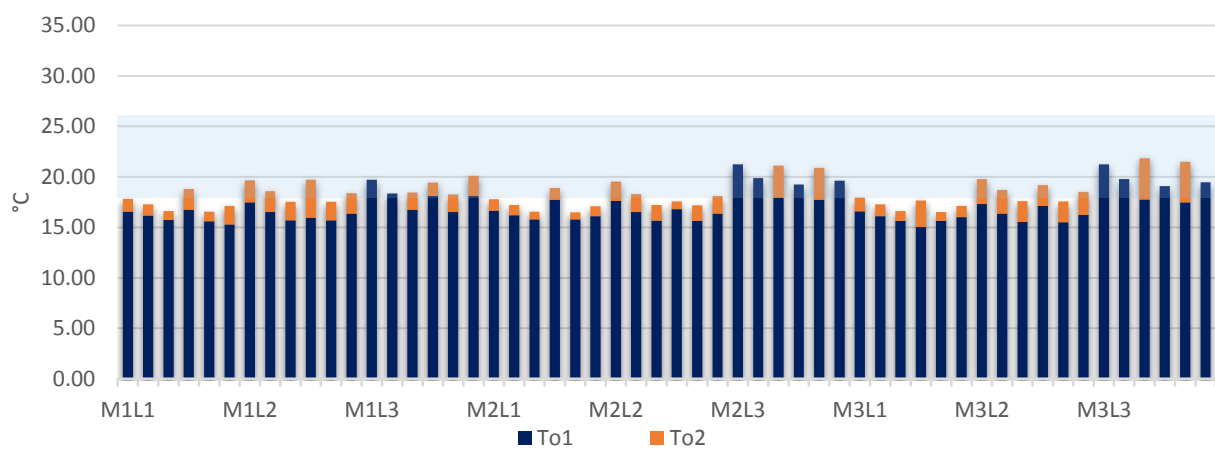
Figura 43. Selección de recámaras para la integración del muro trombe. Fuente: Elaboración propia.

8.2.1 Resultados Mensuales

En la gráfica se puede observar que la $To2$ sigue presentando temperaturas de bajo calentamiento, sin embargo, con la integración del MT hay un constante aumento de temperatura que oscila entre 1.5°C y 2.5°C y que el aumento de temperatura por el sistema MT es proporcional a la To original por lo que los casos con una losa $L3$ (Vigueta y bovedilla) logran mayor incremento de temperatura mientras que los casos con $L1$ (Losa de concreto armado con impermeabilizante) siguen presentando las temperaturas más bajas al interior.

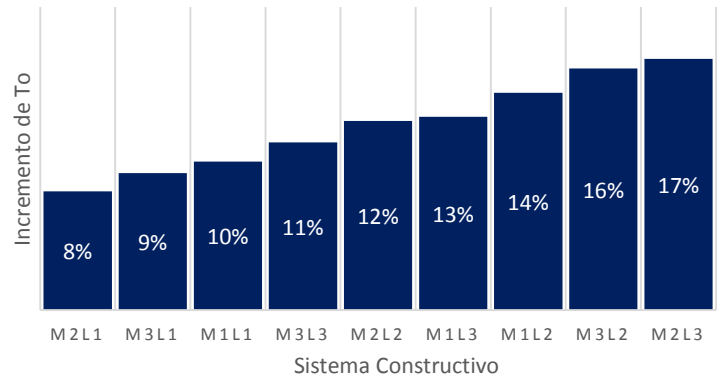
En la Gráfica 54 se muestra los valores del incremento de temperatura al interior de las recámaras como porcentajes de acuerdo al sistema constructivo. Las tres primeras columnas representan casos con losa $L1$ (losa de concreto armado con impermeabilizante); en los siguientes tres lugares predomina la losa $L2$ con dos casos mientras que en los últimos tres lugares que indican el mayor incremento de temperatura, predominan los casos con losa $L3$ (Vigueta y bovedilla). El orden regido por las losas indica la importancia

de ésta en la eficiencia del muro trombe a diferencia del tipo de muro el cual no presenta una tendencia en el orden de la gráfica.

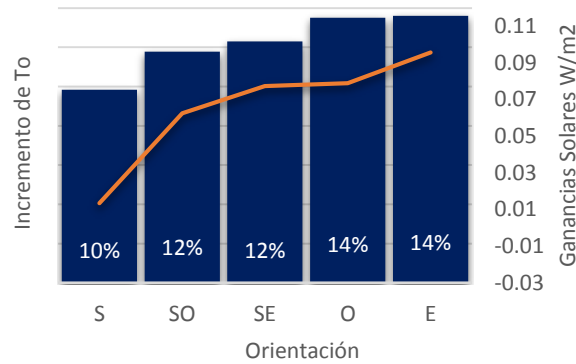


Gráfica 53. Temperaturas operativas originales y con la integración del muro trombe en las fachadas de las Recámaras 1 y 2.Fuente: Elaboración propia

Al analizar los datos de incremento de temperatura al interior de las recámaras de acuerdo al tipo de orientación, se obtuvo la Gráfica 55. Los datos evidencian una mayor ganancia de temperatura por el sistema muro trombe en las orientaciones *E* y *O*, obteniendo para estos casos, cerca de un 14% de incremento de temperatura. Al analizar el resto de las orientaciones, se puede se puede observar que el aporte térmico del muro trombe disminuye cuando la orientación se acerca al *S*, que es donde se presenta el menor incremento de temperatura (10%). La diferencia del 4% entre incrementos de temperatura se ver relacionados con las ganancias solares expresadas en W/m2.



Gráfica 54. Incremento de temperatura por Sistema Constructivo para Recamara 1. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 55. Incremento de Temperatura y Ganancias Solares por Orientación. Fuente: Elaboración propia

El aporte de los aislantes para disminuir la pérdida de calor generado por el sistema *MT* se puede observar analizando los casos con mayor incremento térmico (*L2* y *L3*) los cuales presentaron pérdidas de calor por cubiertas dentro del estudio de *Balance Térmico* para el usuario *U3a* diferencia de los casos con losas *L1* por lo que se propuso un aislante para disminuir la pérdida de calor. Una vez integrado el *MT*, los casos con losas *L1* presentan menores ganancias de calor debido a que la losa no fue aislada y se encuentra más vulnerable a temperaturas exteriores.

8.2.2 Resultados Horarios.

La orientación *S* presentó el menor incremento de temperatura después de la incorporación del *MT* con un incremento de T_o del 10% sin embargo, resulta conveniente hacer un análisis horario para conocer las condiciones térmicas a lo largo del día y realizar una evaluación cualitativa, es por esto que a continuación se muestran resultados horarios durante el día más frío del año (15 de enero) para los casos que presentaron la T_{o2} más baja, dentro del rango de confort térmico.

01. Orientación Sur.

El caso *U3M2L2O1* presentó una T_o mensual de 18.12 por lo que se encuentra dentro del rango de confort. En la Gráfica 59 muestra las temperaturas T_{o1} , T_{o2} y T_e (temperatura exterior); como se puede observar, el incremento de temperatura disminuye a medio día donde las líneas de T_{o1} y T_{o2} se acercan. El mayor incremento sucede en las primeras horas del día aunque no es suficiente para alcanzar el rango de confort térmico. La orientación sur en comparación con el resto de las orientaciones presenta las menores ganancias por la integración del muro trombe, es importante valorar que el incremento de temperatura se concentra durante las mañanas que es cuando existe un mayor requerimiento de calentamiento.

Orientación Suroeste

El caso *U3M2L2O2* presentó una To mensual de 18.28 por lo que se acerca al límite inferior del rango de confort. En la Gráfica 57 se puede observar que el incremento de temperatura disminuye a medio día y es mayor durante las primeras horas del día. Éste incremento mejora las condiciones térmicas logrando llegar al rango de confort por la tarde en durante las mañanas sigue estando por debajo del límite inferior. La orientación suroeste presentó el segundo incremento de temperatura más bajo de acuerdo a los resultados promedios, el control de las rejillas en este caso, juegan un papel importante ya que hay ganancias de calor durante las mañanas aun cuando no reciben ganancias directas de radiación durante ese periodo lo que indica un almacenamiento de calor eficiente del sistema del *MT*.

Orientación Oeste

El caso *U3M2L2O3* presentó una To mensual de 18.45 por lo que también se acerca al límite inferior del rango de confort. En la Gráfica 56 se puede observar que el incremento de temperatura es constante con una variación horaria mínima que fluctúa alrededor de 1.5°C. Éste incremento no es suficiente para alcanzar el rango de confort durante la mañana, sin embargo, alrededor de cuatro horas que se encontraban debajo del límite inferior alcanzan la zona de confort térmico. La orientación oeste presentó el segundo incremento de temperatura más alto de acuerdo a los resultados promedios, la integración del sistema *MT* en esta orientación podría significar un sobrecalentamiento por las ganancias de radiación por las tardes, sin embargo, una vez más la programación de las rejillas permiten una ganancia relativamente uniforme durante el día.

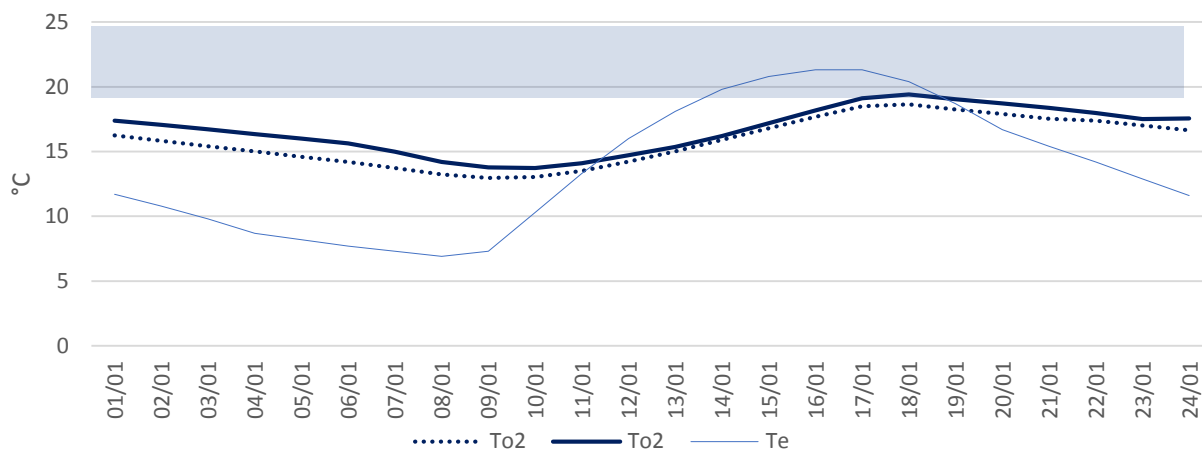
Orientación Este

El caso *U3M1L3O5* presentó una To mensual de 18.25 por lo que se acerca al límite inferior del rango de confort. La Gráfica 60 muestra el incremento de temperatura diario el cual es mayor durante las mañanas con 1.5°C en promedio y disminuye por las tardes. La orientación este es la que mostró el mayor incremento de temperatura por orientación, para este caso, el incremento de temperaturas también se mantiene constante lo largo del día siendo que por las tardes la fachada no recibe radiación solar directa lo que indica un desempeño eficiente del sistema *MT*.

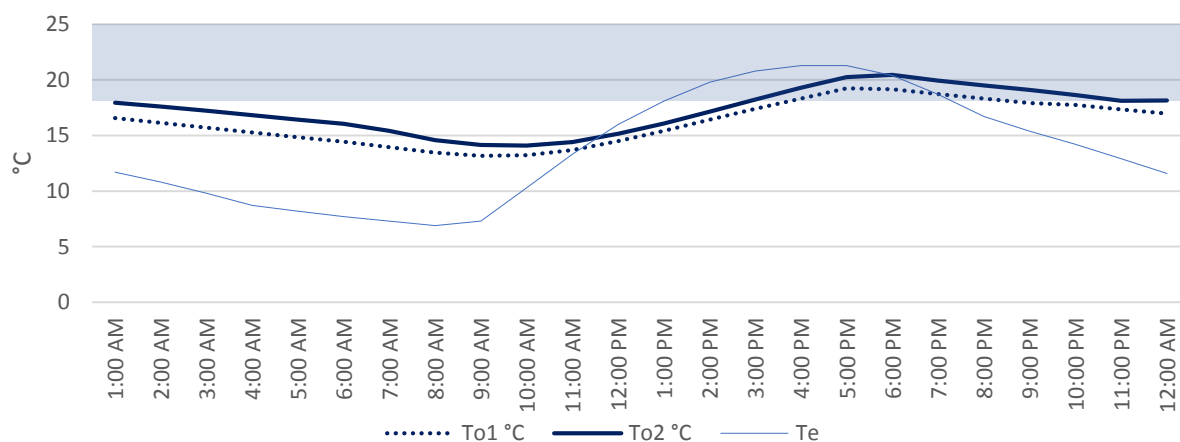
Orientación Sureste

El caso *U3M2L2O6* presentó una To mensual de 18.11 por lo que se acerca al límite inferior del rango de confort. La Gráfica 58 muestra las temperaturas $To1$, $To2$ y Te (temperatura exterior); como se puede observar, el incremento de temperatura es constante con una variación horaria mínima que fluctúa alrededor de 1.5°C. Éste incremento no es suficiente para alcanzar el rango de confort durante la mañana, sin embargo,

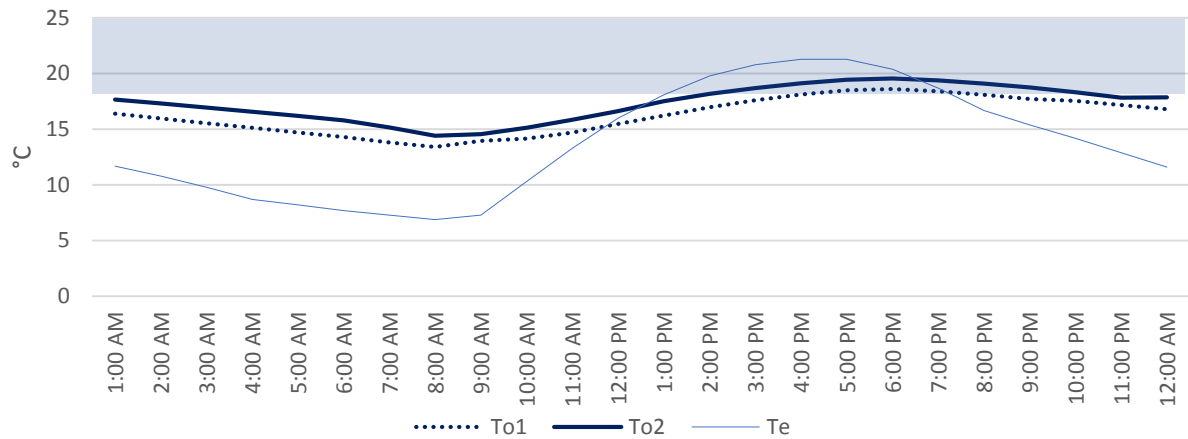
alrededor de cuatro horas que se encontraban debajo del límite inferior alcanzan la zona de confort térmico. El incremento de temperatura de esta orientación la hace colocarse al centro de la escala. El efecto del sistema *MT* es similar al de la orientación *E* aunque en este caso, el incremento de temperatura por las tardes es menor, este efecto podría resultar contradictorio considerando las horas de asoleamiento por fachada, sin embargo, si se comparan los valores de la Gráfica 55, es evidente el efecto de las ganancias solares (W/m^2) en la T_o .



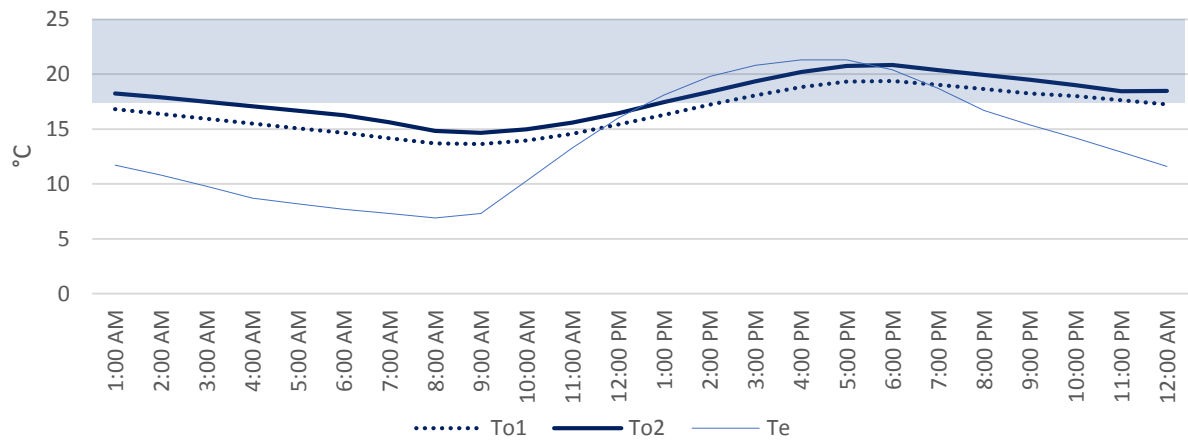
Gráfica 56. Orientación *O* para el caso *U3M2L2O1*. Fuente: Elaboración propia



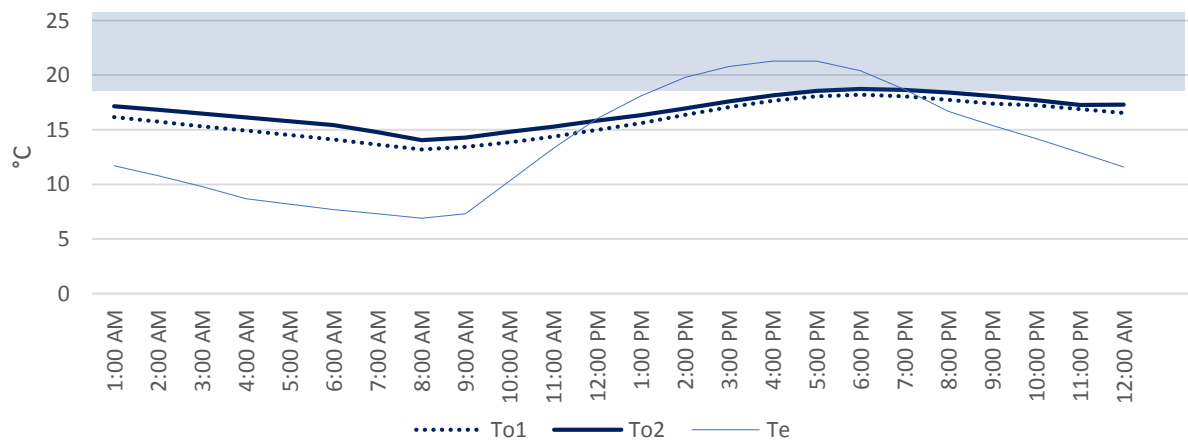
Gráfica 57. Orientación *SO* para el caso *U3M2L2O2*. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 58. Orientación SE. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 59. Orientación S para el caso *U3M2L2O3*. Fuente: Elaboración propia



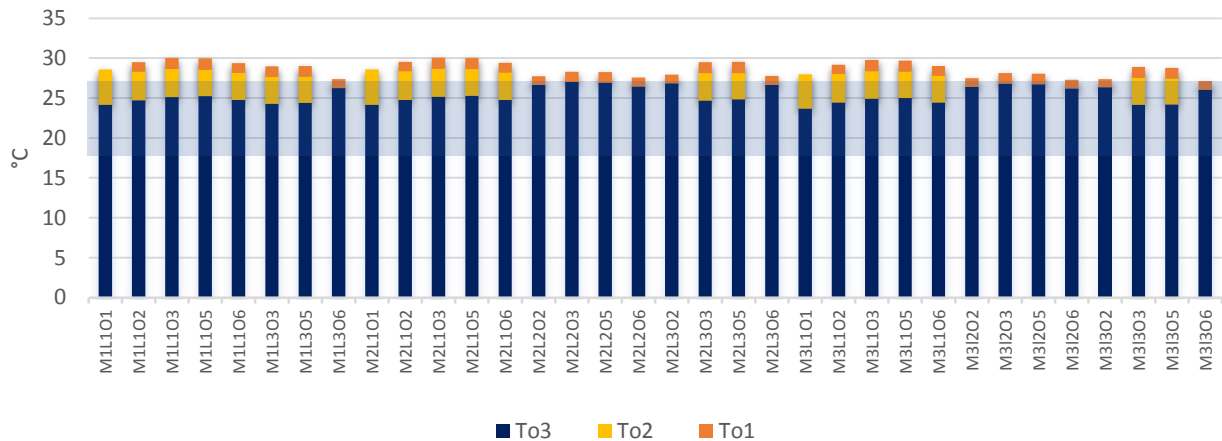
Gráfica 60. Orientación E para el caso *U3MIL3O5*. Fuente: Elaboración propia

8.3 Protección Solar

Las viviendas con usuario *U1* con cinco integrantes por vivienda, mostraron *To* interiores de sobrecalentamiento al evaluar la Recámara 1 durante el mes más cálido (abril) por lo que de acuerdo al clima de la zona, Requerimientos bioclimáticos y Evaluación del Universo de Estudio, se diseñaron dispositivos de control solar para evitar las ganancias de calor por radiación. El **Anexo 2** muestra los datos mensuales obtenidos una vez integrada la protección solar. Debido a que en más del 50% de los casos no se logró una *To* dentro del rango de confort (19.66 como límite inferior y 26.66 como límite superior de temperatura para un 80% de aceptación), se propuso resolver el sobre calentamiento por medio una segunda estrategia de control: reducir los flujos de calor conectivo por medio de aislamiento de cubierta como el elemento más expuesto a la radiación solar. Donald Wattson, establece que “*el aislamiento será de utilidad cuando existen requerimientos de técnicas de enfriamiento durante el verano*” (Watson & Labs, 1992). Los resultados se muestran a continuación.

8.3.1 Resultados Anuales.

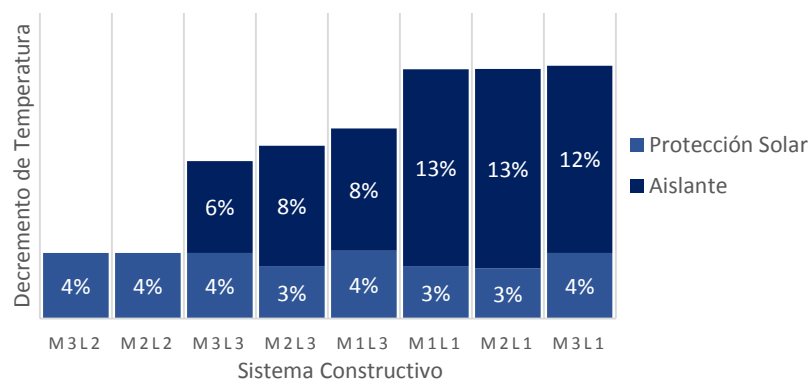
En la Gráfica se muestran los resultados de temperatura obtenidos para el mes de abril donde *To1* indica la temperatura original, *To2* indica la temperatura con la integración de protección solar y *To3* indica la temperatura con la integración del aislamiento de cubiertas, como se puede observar, con la segunda adecuación se logra alcanzar el rango de confort térmico en todos los casos.



Gráfica 61. Decremento de *To* en la recámara 1 a partir de soluciones constructivas. Fuente: Elaboración propia

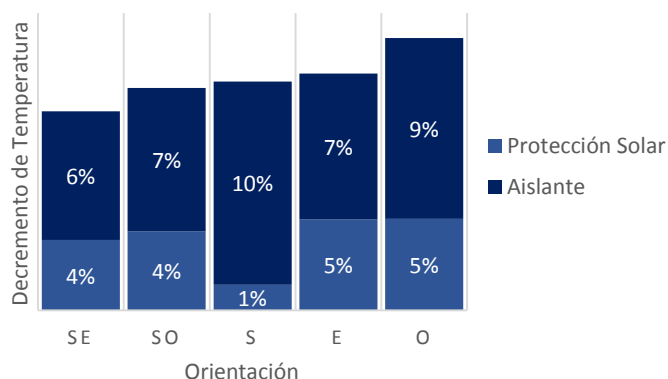
Para conocer el efecto de la orientación y tipo de sistema constructivo en la temperatura interior, se realizó la misma síntesis del bloque anterior, agrupando los resultados de acuerdo a cada variable. En la Gráfica 63 se muestra el decremento de temperatura (%) por sistema constructivo al aplicar las adecuaciones

propuestas, como se puede observar, el aislamiento de la cubierta aporta un mayor decremento principalmente con las losas *L1* (concreto armado con impermeabilizante) seguido por la losa *L3* (vigüeta y bovedilla). Para cuestiones de sobre calentamiento, la losa *L2* (concreto armado con loseta vidriada es la que presenta menores requerimientos ya que logra temperaturas de confort sólo con la integración de los dispositivos de control solar. El efecto de la protección solar es similar para todos los tipos de sistemas constructivos con valores de entre 3% y 4% de decremento de T_o .



Gráfica 62. Decremento de T_o por Sistema Constructivo. Fuente: Elaboración propia

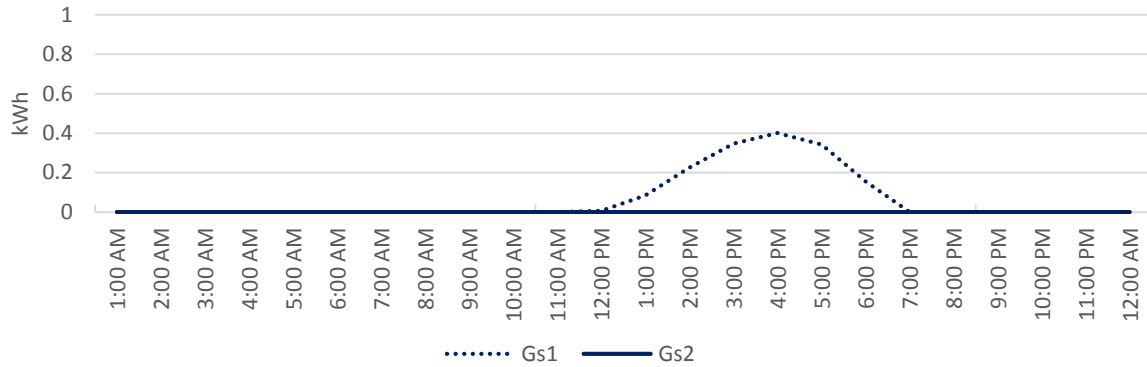
En la Gráfica 63 se muestra el decremento de temperatura (%) por orientación al integrar la protección solar y el aislante en cubierta. En este caso, la orientación repercute en mayor medida en el decremento de temperatura obtenido. Como se puede observar, la orientación *S* presenta un menor decremento a comparación del resto lo cual se relaciona al igual que en el caso del muro trombe, con las ganancias solares por ventanas en W/m^2 . El efecto del aislante varía 4% entre los casos extremos donde las orientaciones *S* y *O* muestran las mayores pérdidas mientras que el resto de las orientaciones presentan un decremento similar entre 6% y 7%.



Gráfica 63. Decremento de T_o por Orientación. Fuente: Elaboración propia.

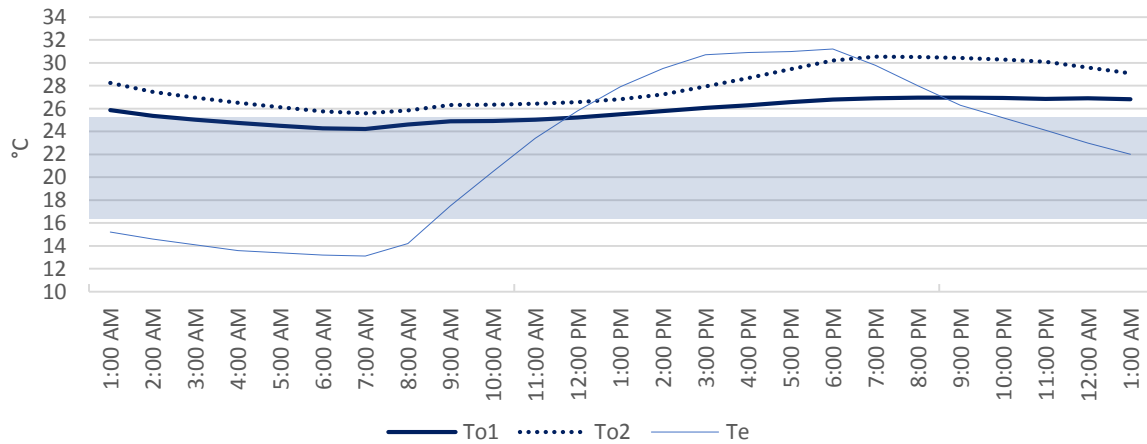
8.3.2 Resultados Horarios

Para conocer el aporte al confort térmico durante el día, se muestran los resultados obtenidos en los casos con mayor sobrecalentamiento de cada orientación. Los resultados que se muestran corresponden a las ganancias solares por ventanas exteriores en kWh y las T_o en °C.

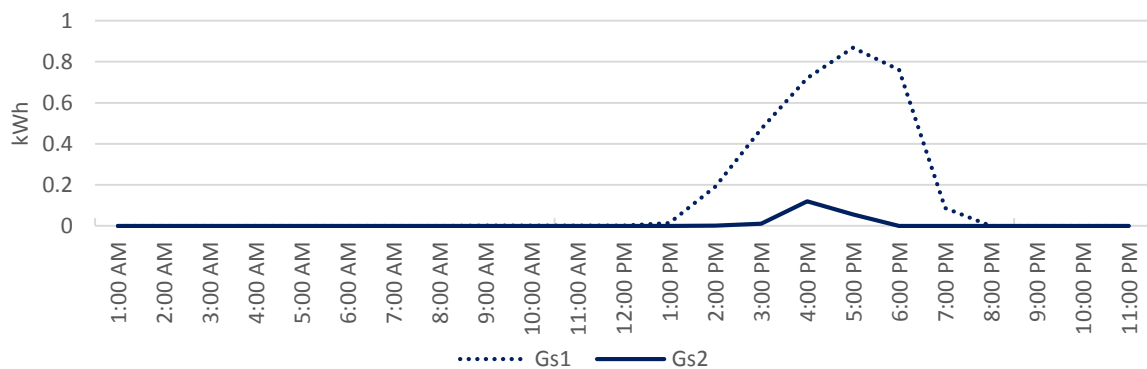


Gráfica 64. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso *MIL201* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 64 muestra las ganancias solares por ventanas exteriores durante los días de diseño (20 y de abril) para el caso original (G_{s1}) y con dispositivo de control solar (G_{s2}) donde prácticamente se eliminan las ganancias al interior durante el día. La Gráfica 65 muestra las T_o horarias durante el mismo periodo para el caso original (T_{o1}) y con dispositivo de control solar (T_{o2}) donde se puede observar que en el punto de mayor sobrecalentamiento a las 6:00 PM, la temperatura disminuye de los 30.5°C a 26.9°C.

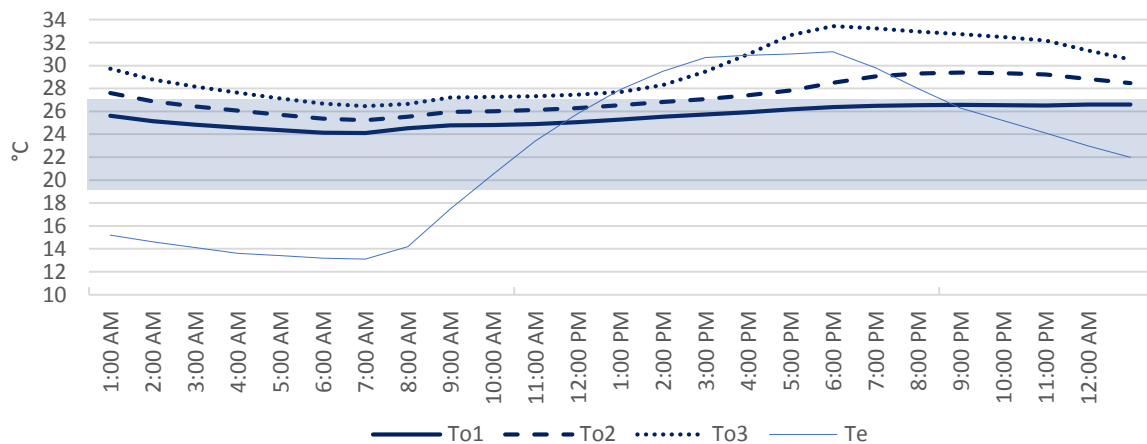


Gráfica 65. Temperaturas operativas para el caso *MIL201* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 66. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso *M2L3O2* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 66 muestra las ganancias solares por ventanas exteriores durante el 20 de abril para el caso original (*Gs1*) y con dispositivo de control solar (*Gs2*), como se puede observar, las ganancias más altas se presentan entre 3:00 y 6:00 PM las cuales disminuyen de 0.86 kWh a 0.11 kWh en su punto más alto a las 4:00 PM. La Gráfica 67 muestra las *To* horarias durante el mismo periodo para el caso original (*To1*) y con dispositivo de control solar (*To2*) donde se puede observar que en el punto de mayor sobrecalentamiento a las 6:00 PM, la temperatura disminuye de los 33.23°C a 29. °C.

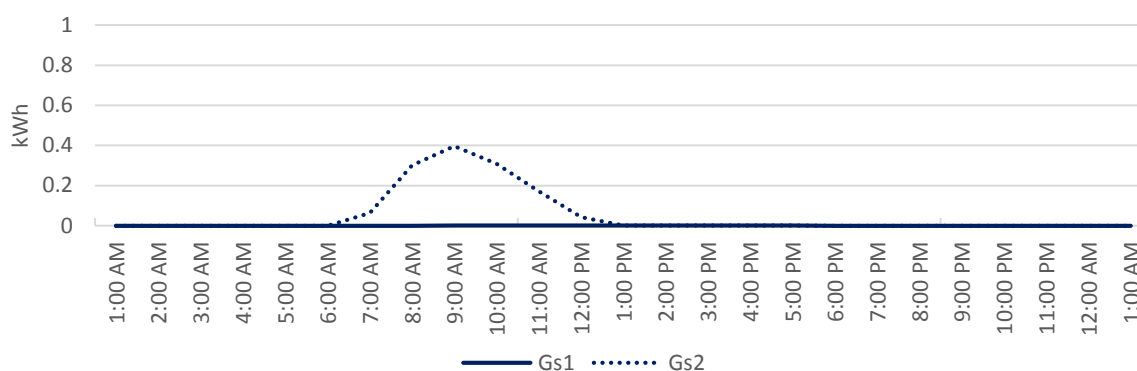


Gráfica 67. Temperaturas operativas para el caso *M2L3O2* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia

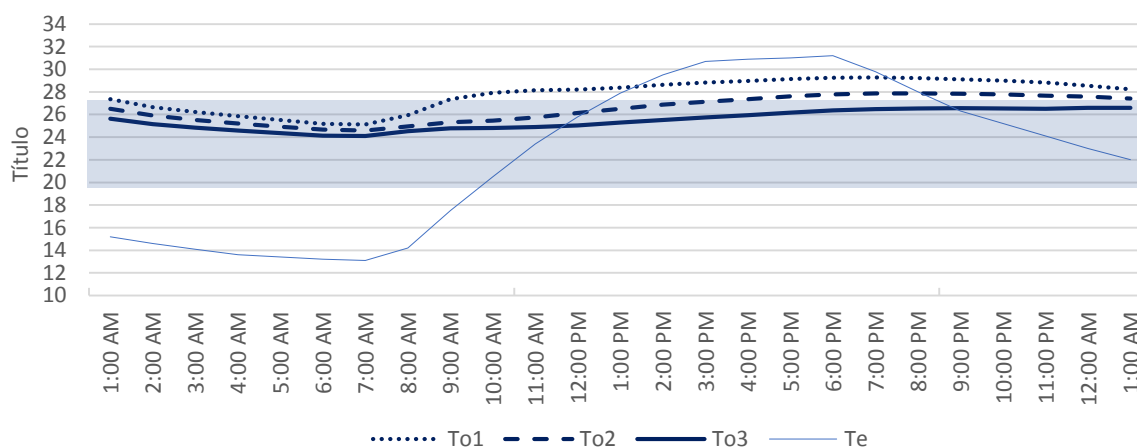
La Gráfica 68 muestra las ganancias solares por ventanas exteriores durante el 20 de abril para el caso original (*Gs1*) y con dispositivo de control solar (*Gs2*). Para este caso, las ganancias se presentan durante las mañanas, entre 6:00 AM y 12: PM. A las 9:00 AM se presentan los niveles más altos de ganancias solares con cerca de 0.40 kWh. En la Gráfica 69 se muestran las *To* horarias durante el mismo periodo para el caso original (*To1*) y con dispositivo de control solar (*To2*) donde se puede observar que aunque las ganancias

solares por ventanas exteriores se presentan sólo en la mañana, las To disminuyen a lo largo del día cerca de 2°C .

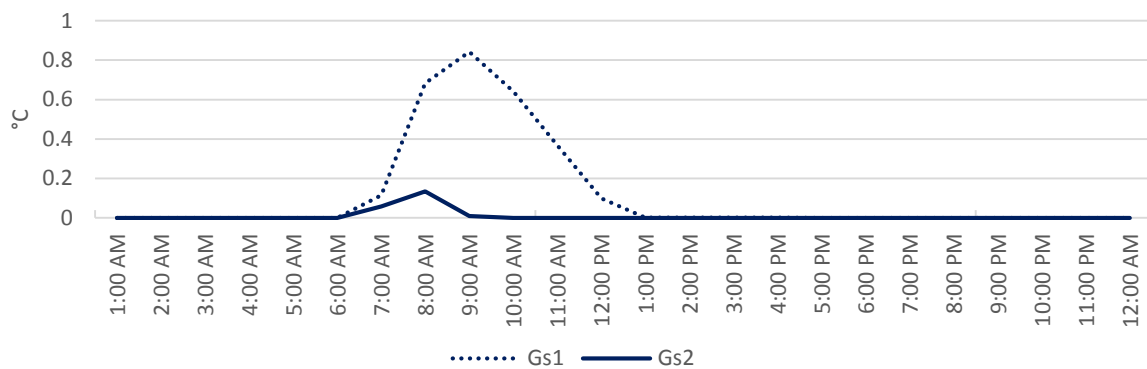
La Gráfica 70 muestra las ganancias solares por ventanas exteriores durante el 20 de abril para el caso original G_{s1} y con dispositivo de control solar G_{s2} . Para este caso, las ganancias se presentan durante las mañanas, entre 6:00 am y 13: pm. A las 10:00 am se presentan los niveles más altos de ganancias solares con cerca de 0.90 kWh. En la Gráfica 71 se muestran las To horarias durante el mismo periodo para el caso original $To1$ y con dispositivo de control solar $To2$ donde se puede observar que las To disminuyen a lo largo del día cerca hasta 3°C .



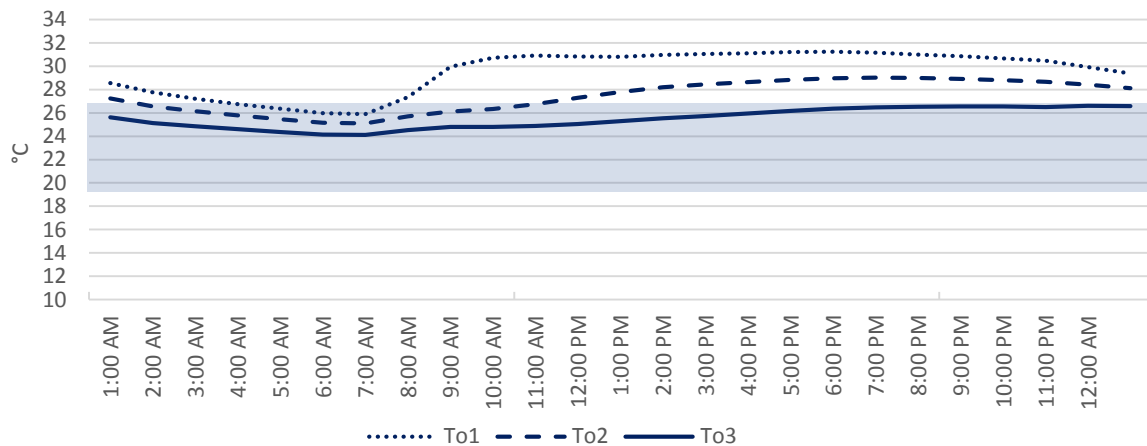
Gráfica 68. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso $M3L2O3$ durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 69. Temperaturas operativas para el caso $M3L2O3$ durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 70. Ganancias solares por ventanas exteriores para el caso *M3L2O5* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 71. Temperaturas operativas para el caso *M3L2O5* durante los días de diseño de verano antes y después de integrar el dispositivo de control solar. Fuente: Elaboración propia.

8.4 Conclusión Capitular

En el octavo capítulo se presentaron los resultados de la evaluación de aislantes como solución constructiva para mejorar el desempeño térmico interior como una estrategia para disminuir las pérdidas de calor por flujos convectivos, la ubicación de aislante se estableció de acuerdo a los resultados de Balance Térmico. Se generó información de *To* anual al interior de la vivienda y los datos indicaron que para el usuario *U1*, las estrategias son necesarias únicamente para un 23% de las viviendas. Una vez integradas las estrategias, todos los casos logran una *To* anual de confort. Para el usuario *U2*, el 75% de los casos se encuentran por debajo del rango de confort térmico, al realizar las adecuaciones indicadas previamente, todos los casos logran una *To* anual de confort. Para el usuario *U3* por el contrario, no se presentaron casos que en condiciones *originales* tuvieran una *To* dentro de confort térmico, por lo que las adecuaciones se aplicaron a todos los casos, logrando *To* de confort sólo en un 34% de las viviendas. Gráfica 52.

Para el usuario *U3*, se propone la ganancia de calor por radiación aplicando la estrategia por medio de un sistema de Muro Trombe. El sistema se propone en una de las dos recámaras como espacio de prioridad para el confort de una vivienda con un integrante, priorizando aquella con orientación *S* y variaciones (*SE*, *SO*), aunque también se generan evaluaciones *E* y *O*. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que las orientaciones *E* y *O* son las más favorable para la incorporación del *MT* con un promedio de incremento de temperatura de cerca de un 14% mientras que las orientaciones *S*, *SE* y *SO* mostraron un promedio de incremento de temperatura de entre 10% y 12%. Estas tres últimas pueden considerarse igual de favorables debido a que el incremento de temperatura disminuye en promedio 2% entre sí. La diferencia de incremento se debe principalmente a las ganancias solares.

Para el usuario *U1*, se proponen dispositivos de sombreado para disminuir las ganancias de calor por radiación solar. Como se puede observar en la Gráfica, la protección solar logra disminuir considerablemente las *To*, sin embargo, sólo se logra llegar al rango de confort térmico en un 44% por lo que se propone una segunda estrategia para disminuir el flujo de calor por conducción a partir de un aislante al exterior en la cubierta ya que es la superficie con mayor exposición a la radiación solar. Los resultados muestran que con el aislante térmico se logra el confort térmico en todos los casos.

La aplicación de soluciones al Universo de Estudio, se sintetiza en la Tabla 22, Como se puede observar, el aislante térmico al interior para disminuir los flujos de calor por conducción, es la estrategia con mayores casos de éxito con un 52%, seguido por el sistema Muro Trombe para promover ganancias internas con un 24%. El 15% de la muestra, solucionó los requerimientos bioclimáticos con aislante al exterior sobre cubiertas para minimizar los flujos de calor por conducción mientras que un 9% logró niveles de confort minimizando las ganancias solares por radiación a partir de dispositivos de control solar.

Tabla 22.
Soluciones aplicadas por estrategias de control climático.

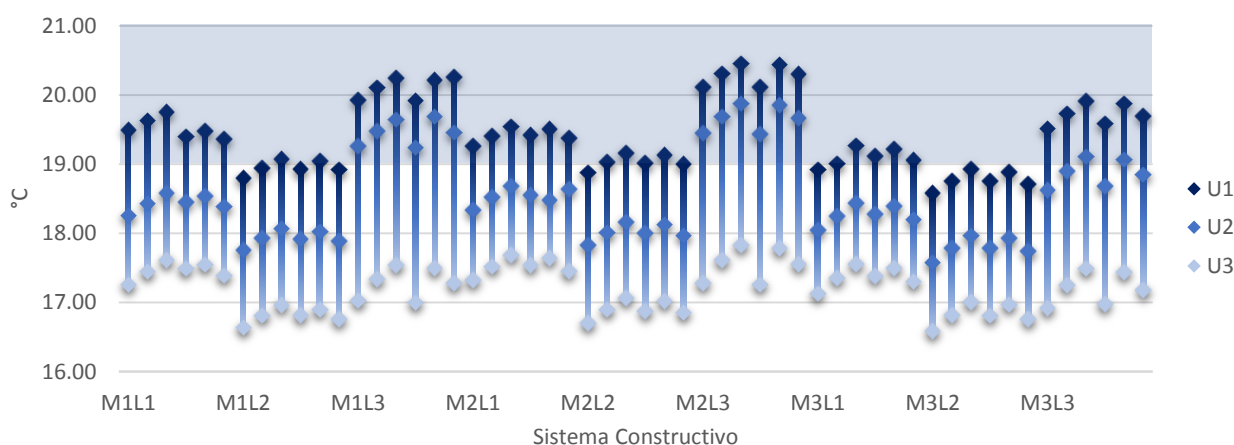
Temporada	Control	Solución	%
Invierno	Promover ganancias solares	Muro Trombe	24%
	Minimizar flujos de calor por conducción	Aislante al interior	52%
Verano	Minimizar ganancias solares	Dispositivos de Control Solar	9%
	Minimizar flujos de calor por conducción	Aislante al exterior	15%

Nota: Fuente: Elaboración propia

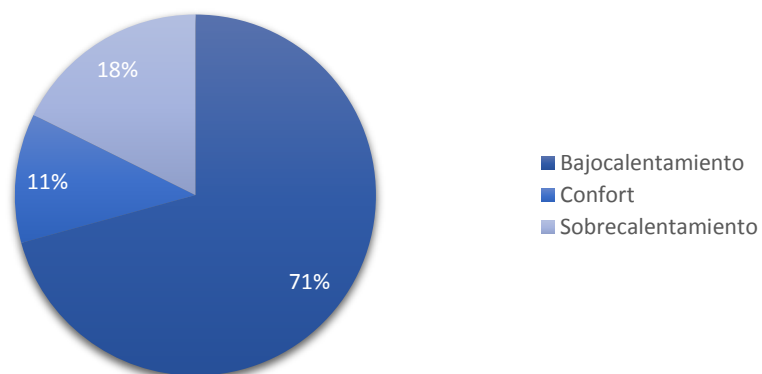
9. Resultados Finales

La investigación se desarrolló en base a una muestra representativa de 164 modelos de simulación numérica para exponer las condiciones térmicas al interior de la *Vivienda Social en el Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, diseñar soluciones constructivas para mejorar el confort interior y evaluar las propuestas generadas.

La Gráfica 72 muestra los valores originales de T_o anuales para las viviendas con los tres tipos de usuarios en *grupos* por sistema constructivo que incluyen las seis orientaciones evaluadas antes de aplicar las soluciones constructivas en la envolvente, el sombreado azul indica los límites de la zona de confort térmica. Como se puede apreciar en la primera gráfica y se demostró en el documento, existe un problema de enfriamiento en el 71% de los casos de estudio, un 11% se encuentra con T_o anuales dentro de confort y un 18% presenta T_o de sobrecalentamiento durante primavera. Gráfica.

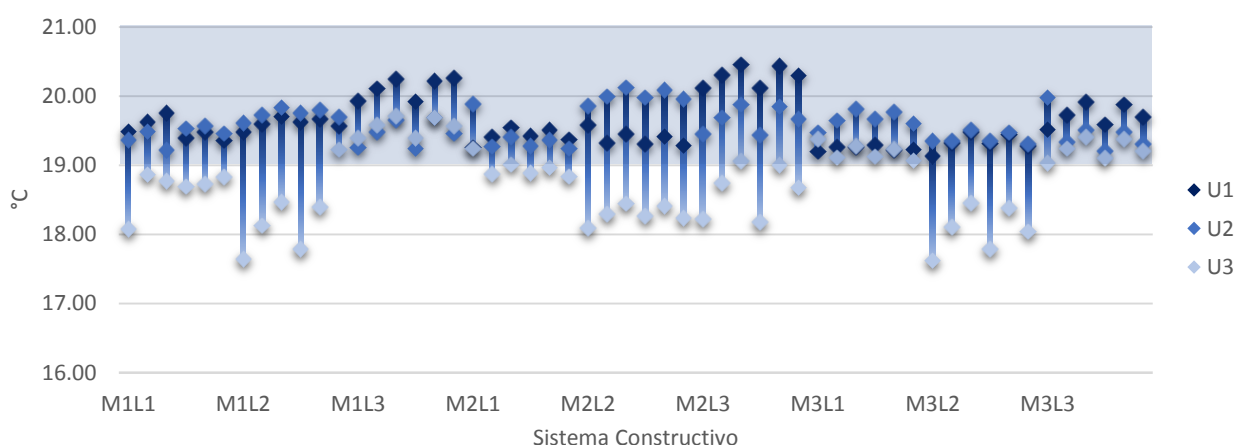


Gráfica 72. T_o anuales al interior de las viviendas de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

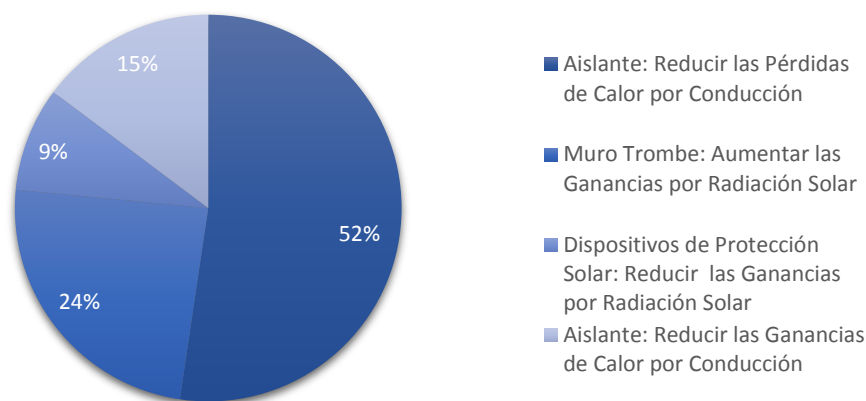


Gráfica 73. Porcentajes de casos con bajo calentamiento, confort y sobrecalentamiento del universo de Estudio. Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 74 muestra los valores originales de T_o anuales para las viviendas con los tres tipos de usuarios en *grupos* por sistema constructivo que incluyen las seis orientaciones evaluadas después de aplicar las soluciones constructivas en la envolvente por lo que la gráfica es un resumen de las condiciones térmicas al interior con la integración de las soluciones constructivas. El sombreado azul que indica los límites de la zona de confort térmica por lo que como se puede apreciar, las T_o para el usuario $U1$ y $U2$ se encuentran dentro del rango de confort en todos los casos. Para el usuario $U3$ se realizaron adecuaciones puntuales en la Recámara 1 al igual que en el caso del usuario $U1$, es por esto que las T_o anuales siguen estando por debajo del límite inferior de confort.



Gráfica 74. T_o anuales al interior de las viviendas de estudio después de integrar la solución constructiva en envolvente. Fuente: Elaboración Propia.



Gráfica 75. Porcentaje de soluciones constructivas de acuerdo al Universo de Estudio. Fuente: Elaboración Propia.

La Gráfica 75 muestra el porcentaje de soluciones constructivas aplicadas en el UE . Como se puede observar, el 52% de los casos solucionaron los problemas de confort térmico por medio de la integración de

aislantes en la envolvente; en el 24% de los casos se aplicó la integración de Muro Trombe en fachadas para resolver problemas de bajo calentamiento; en el 15 % de los casos se redujeron las T_o interiores por medio de aislantes en las cubiertas y por último en un 9% de los casos se resolvieron problemas de sobrecalentamiento en la Recámara 1 al aplicar dispositivos de control solar.

9.1 Soluciones Constructivas en la Envolvente

En base al análisis realizado en el último capítulo, se generó una matriz de soluciones constructivas en la envolvente por tipo usuario mostrado en la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26. La distribución dichas tablas tiene el siguiente orden: Los indicadores verticales se refieren al tipo de sistema constructivo separando tipos de muros y tipos de losas mientras que los indicadores horizontales se refieren a la solución adecuada de acuerdo al estudio así como que tipo de orientación es pertinente. En la Tabla 23 se indica la clave de cada solución así como su descripción.

Tabla 23.

Clave y descripción de Soluciones Constructivas propuestas para caso de estudio.

Solución	Descripción
Sa	Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales o similar
Sb	Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas o similar
Sc	Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar
Sd	Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar y Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales o similar
Se	Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar y Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas o similar
Sf	Aislamiento exterior de techumbres con poliestireno expandido o similar, Aislamiento de suelos flotantes con lanas minerales o similar y un Sistema ETICS Isofex "ISOVER" de aislamiento exterior de fachadas o similar
Sg	Sistema de Muro Trombe Integrado en Fachada
Sh	Dispositivos de control solar en ventanas

Nota: Elaboración Propia

Las soluciones constructivas para las viviendas con el usuario U1 (Tabla 24) son dos principalmente: El aislamiento en techos para disminuir los flujos de calor por conducción tanto en verano como en invierno y los dispositivos de control solar. El aislamiento de fachadas es una tercera solución que se propone únicamente para los casos de vivienda que cuentan muros de concreto armado de 12 cm y losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico en el exterior.

Para el usuario U2 (Tabla 25) predominan tres tipos de soluciones: el aislamiento de suelos, el aislamiento de techos y una combinación de aislamiento en suelo y techos; una solución con menos casos a aplicar es

una combinación de aislamiento de techos y fachadas; por último, existe un caso en el que se recomienda aislar suelos techos y muros y otro caso aislado en el que sólo se recomienda aislar fachadas.

Por último, para el usuario U3 (Tabla 26) se proponen tres tipos de soluciones principalmente: el aislamiento de techos y fachadas y el aislamiento de suelos, fachadas y techos y la integración del muro trombe en fachada; en segundo lugar, predominan otros tres tipos de soluciones: el aislamiento de suelos, el aislamiento de fachadas y la combinación de aislamiento en suelos y techos. En este último caso no se logran niveles de confort en todos los casos, pero si se mejora el confort térmico al interior.

Tabla 24.

Soluciones Constructivas propuestas para las viviendas con Usuario U1.

		Sb					Sc					Sg							
		S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE
Muros de Block hueco de 10 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																		
	Losa de concreto armado con loseta vidreada al exterior																		
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																		
Muros de Block hueco de 13 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																		
	Losa de concreto armado con loseta vidreada al exterior																		
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																		
Muros de Concreto armado de 12 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																		
	Losa de concreto armado con loseta vidreada al exterior																		
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																		

Nota: Elaboración Propia

Tabla 25.
Soluciones Constructivas propouestas para las viviendas con Usuario U1.

		Sa				Sb				Sc				Sd				Se				Sf			
		S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE
Muros de Block hueco de 10 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																								
	Losas de concreto armado con loseta vidreada al exterior																								
	Losas de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																								
Muros de Block hueco de 13 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																								
	Losas de concreto armado con loseta vidreada al exterior																								
	Losas de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																								
Muros de Concreto armado de 12 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																								
	Losas de concreto armado con loseta vidreada al exterior																								
	Losas de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																								

Nota: Elaboración Propia

Tabla 26.

Soluciones Constructivas propouestas para las viviendas con Usuario U1.

		Sa					Sb					Sd					Se					Sf					Sh				
		S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE	S	SO	O	N	E	SE
Muros de Block hueco de 10 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																														
	Losa de concreto armado con loseta vitreada al exterior																														
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																														
Muros de Block hueco de 13 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																														
	Losa de concreto armado con loseta vitreada al exterior																														
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																														
Muros de Concreto armado de 12 cm	Losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior																														
	Losa de concreto armado con loseta vitreada al exterior																														
	Losa de Vigueta y bovedilla de poliestireno expandido																														

Nota: Elaboración Propia

9.2 Recomendaciones para nuevas construcciones

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del caso de estudio para ser consideradas en la construcción de nuevas viviendas Tabla 27 para lo cual se asignó un valor de conveniencia V en proporción al número de variables n de sistemas constructivos (eje horizontal) y de orientaciones (eje vertical) de acuerdo al desempeño térmico por lo que en el mejor caso del eje horizontal $d = 9$ y el mejor caso en el eje vertical $d = 6$; la tabla muestra un cruce de valores producto de los valores V de cada eje. Los resultados se muestran como porcentajes de *conveniencia* de acuerdo al desempeño térmico donde el 100% es el mejor caso. Los valores de la Tabla 27. se muestran en la Gráfica 76

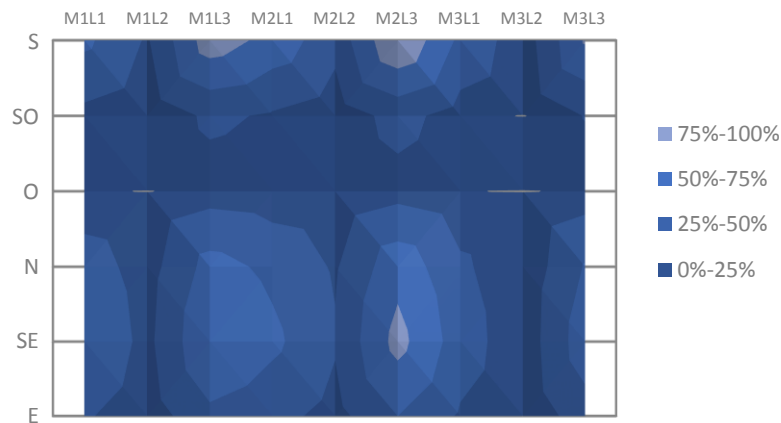
$$V_n = \frac{1}{n} \times d$$

$$n \times v = 1$$

Tabla 27.

Evaluación de desempeño térmico de los casos de estudio en base al sistema constructivo y a la orientación.

	V	M1			M2			M3		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
		6%	2%	9%	7%	3%	10%	4%	1%	8%
O1	10%	56%	22%	89%	67%	33%	100%	45%	11%	78%
O2	5%	28%	11%	45%	33%	17%	50%	22%	6%	39%
O3	3%	19%	7%	30%	22%	11%	33%	15%	4%	26%
O4	8%	46%	19%	74%	56%	28%	83%	37%	9%	65%
O5	7%	37%	15%	59%	45%	22%	67%	30%	7%	52%
O6	2%	9%	4%	15%	11%	6%	17%	7%	2%	13%



Gráfica 76. Evaluación de desempeño térmico de los casos de estudio en base al sistema constructivo y a la orientación. Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos, se hacen las siguientes recomendaciones:

Referente a los sistemas constructivos:

- Se recomienda el uso de vigueta y bovedilla para losas.
- En caso de que la losa sea de concreto armado, se recomienda el uso de impermeabilizante y combinar el sistema con muros de block hueco ya sea de 10 o 13 cm de espesor.
- Para las losas de concreto armado se debe evitar el uso de loseta vidriada al exterior. En caso de usar dicho tipo de sistema constructivo en losa sólo se recomienda el uso de muro de block de 13 mm de espesor en muros.

Referente a la Orientación:

- Se recomienda dar preferencia a las orientaciones *S* y *SE*.
- La orientación *N* también es recomendable en caso de que no se pueda cumplir la condición anterior.
- La orientación *E* debe evitarse en la medida de lo posible.
- No se recomiendan las orientaciones *SO* y *O*.

10. Conclusión

De acuerdo al análisis climático las principales condicionantes son las temperaturas medias por debajo del confort durante prácticamente todo el año, con excepción de los meses extremos de primavera. De acuerdo al análisis bioclimático, los principales requerimientos bioclimáticos son para la temporada de invierno: ganancias internas de calor, ganancias solares directas y protección solar de ventanas.

Para la investigación se usó un modelo de simulación numérica el cual fue calibrado y validado de acuerdo a la metodología descrita en el Capítulo 5 para lograr los valores de error dentro del rango aceptado por *ASHRAE* con un porcentaje de MBE (Tendencia Media de Error) de 7% y 5% y un porcentaje de CVMSR (Variación Acumulada de la Raíz Media de Error al Cuadrado) 13% y 7% para los valores de bulbo seco y humedad relativa respectivamente. Las variables estadísticas definidas para representar la población de estudio fueron orientación, usuario y materiales en la envolvente dando como resultado un Universo de Estudio de 162 casos.

En base a una evaluación anual y mensual se obtuvo que un 71% de los casos de estudio presentaron niveles por debajo del rango de confort, un 11% se encuentra con T_o anuales dentro de confort y un 18% presenta T_o de sobrecalentamiento durante primavera (Capítulo 5), de acuerdo al análisis se concluye que la orientación Norte en el modelo de vivienda descrito tiene un mayor efecto en la oscilación térmica entre el mes más cálido y el mes más frío mientras que el resto de las orientaciones presentan resultados con variaciones menores al 10%. Los elementos constructivos de la envolvente que presentan mayores pérdidas de calor de acuerdo al Balance Térmico son Suelos Sobre Terreno, Muros y Losas o Cubiertas, aunque la pérdida de kWh dependerá en mayor medida por la cantidad de integrantes por vivienda por lo que las adecuaciones deberán proponerse de acuerdo al tipo de usuario.

La relación directa entre las temperaturas operativas T_o al interior de las viviendas y los tipos de sistemas constructivos justifica la iniciativa de disminuir los flujos de calor tanto en temporada fría como calurosa para beneficiar el confort térmico interior (Capítulo 6). La relación entre T_o y tipo de usuario indica un requerimiento de adecuación para el 23% de los casos para el usuario $U1$ (cinco integrantes por vivienda). Una vez integradas las estrategias, todos los casos logran una T_o anual de confort. Para el usuario $U2$ (tres integrantes por vivienda), el 75% se encuentra por debajo del rango de confort térmico, al realizar las adecuaciones indicadas previamente, todos los casos logran una T_o anual de confort. Para el usuario $U3$ (un integrante por vivienda) no se presentaron casos que en condiciones *originales* tuvieran una T_o dentro de confort térmico, por lo que las adecuaciones se aplicaron a todos los casos, logrando T_o de confort sólo en un 34%. Gráfica 52.

La solución constructiva con mayores casos de éxito es el aislante térmico al interior para disminuir los flujos de calor por conducción con un 52%, seguido por el sistema Muro Trombe para promover ganancias internas con un 24%. El 15% de la muestra, solucionó los requerimientos bioclimáticos con aislante al exterior sobre cubiertas para minimizar los flujos de calor por conducción mientras que un 9% logró niveles de confort minimizando las ganancias solares por radiación a partir de dispositivos de control solar. Tabla 22

En base a los resultados obtenidos, se hacen las siguientes recomendaciones. Referente a los sistemas constructivos se recomienda el uso de vigueta y bovedilla para losas; en caso de que la losa sea de concreto armado se recomienda el uso de impermeabilizante y combinar el sistema con muros de block hueco ya sea de 10 o 13 cm de espesor; para las losas de concreto armado se debe evitar el uso de loseta vidriada al exterior; en caso de usar dicho tipo de sistema constructivo en losa sólo se recomienda el uso de muro de block de 13 mm de espesor en muros.

Referente a la Orientación se recomienda dar preferencia a las orientaciones *S* y *SE*; la orientación *N* también es recomendable en caso de que no se pueda cumplir la condición anterior; la orientación *E* debe evitarse en la medida de lo posible y no se recomiendan las orientaciones *SO* y *O*.

De acuerdo a las características del clima de la *ZMVC*M y a la población de estudio, el uso de aire acondicionado y calefacción en la vivienda social es despreciable por lo que la eficiencia térmica en los casos de estudio no representa un ahorro de energía pero sí una mejora en las condiciones térmicas interiores lo que implica mejores niveles de confort y calidad de vida.

La metodología aplicada en la investigación puede ser usada al modificar las variables de estudio, ya sea en diferentes climas de la república donde el ahorro energético tendrá un mayor impacto en el beneficio por eficiencia térmica; en diferentes tipologías de edificio, (no necesariamente en vivienda) que involucrarán diferentes tipos de usuarios y materiales de construcción.

Bibliografía

Alías, H. M. & Jacobo, G. J., 2010. Eficiencia energética y sostenibilidad en viviendas de interés social: incidencia del material de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el confort higrotérmico interior. *2º Congresso Internacional Sustentabilidade E Habitação De Interesse Social*.

Anon., 2009. *Energy Plus Engineering Referenca Online*. [En línea].

Architectural Central Europe, 1999. *A Green Vitruvius: Principles and Practice of Sustainable Architectural Design*. London: James & James.

ASHRAE, 2010. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta : s.n.

Azpeitia, G. G., Morales, G. B. & Torres, R. P. R., 2007. El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa*, pp. 45-57.

Backer, N. & Standeven , M., 1996. Thermal Comfort in Free Running Buildings. *Energy and Buildings*, Issue 23, pp. 175-182.

BBVA, UNAM, 2013. *Situación Inmobiliaria. México*, Distrito Federal: BBVA.

Building and Construction Authority of Singapour, 2013. *Builiding and Construction Authority*. [En línea]

Available at: <http://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/existingbldgretrofit.pdf>
[Último acceso: mayo 2013].

Carrasco, C. & Morillón, D., 2004. Adecuación Bioclimática de La Vivienda de Interés Social del Noroeste de México con Base al Análisis Térmico de La Arquitectura Vernácula. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, pp. 05.97-05.102.

Castrejón, A. F., Cruz, M. G. A. & Lomelí, A. A., s.f. *Análisis Térmico Comparativo por Medio de Simulación Numérica de Tres Viviendas de Interés Social en Tres Diferentes Climats de La República Mexicana*. [En línea]

Available at: http://www.lema.arq.uson.mx/rab/?page_id=25
[Último acceso: 24 julio 2013].

CIBSE, 2006. *CIBSE Guide A Appendix 3.A8*, s.l.: s.n.

Corral Sánchez, J., 2012. *La Vivienda “Social” En México Pasado - Presente - Futuro?*. Distrito Federal: Sistema Nacional de Creadores de Arte Emisión.

Corral, M. A. J. S., 2012. *La Vivienda “Social” En México Pasado - Presente - Futuro?*. Distrito Federal: Sistema Nacional de Creadores de Arte Emisión.

CYPE Ingenieros, S., 2013. *Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción*. [En línea] Available at: http://www.mexico.generadordeprecios.info/obra_nueva/Aislamientos_e_impermeabilizaciones/Aislamientos/Suelos_flotantes/NAL010_Aislamiento_de_suelos_flotantes_con.html

Di Bernardo, A., Jacobo, G. J. & Alías, H. M., 2008. Desempeño Térmico–Energético de Viviendas Sociales del Nea. Simulaciones con La Herramienta Informática “Ecotect”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, pp. 08.17-08.24.

Ehsan Asadi, M. G. d. S. C. H. A. L. D., 2012. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, pp. 81-87.

Energy Research Group, 2007. *Un Vitruvio ecológico. Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible*. España: Editorial Gustavo Gili, S.A..

Fanger, P. . O., 1970. *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.

Fernandez, J. M., 2011. En: *Eficiencia Energética en los Edificios*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, Editor, pp. 144-160.

Figueroa, A., Alpuche, M. & Alcántara, A., 2013. *Análisis Térmico Comparativo por Medio de Simulación Numérica de Tres Viviendas de Interés Social en Tres Diferentes Climas de La República Mexicana*, s.l.: s.n.

Figueroa, A. y otros, 2013. *Sistemas Constructivos de Muros y Techos de la Envolvente Utilizados en la Zona Norte de la Ciudad de México*, Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Foucquier, A. y otros, 2013. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 23, pp. 272-288.

Fuentes, V. A., 2011. *Cálculos Para el Trazo de la Gráfica Solar*. México, D.F: s.n.

Fuentes, V. A., 2011. *Hoja de cálculo de Datos Climáticos*. Mexico, D.F.: s.n.

Galvin, R., 2013. *The Center of Social and Economic Research*. [En línea] Available at: http://www.cserge.ac.uk/sites/default/files/edm_2009_11.pdf [Último acceso: mayo 2013].

Givoni, B., 1976. *Climate and Architecture*. London: Applied Science Publishers.

Gobierno Federal, 2014. *PROGRAMA Nacional de Vivienda 2014-2018*. [En línea] Available at: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342865&fecha=30/04/2014&print=true [Último acceso: 2014 mayo 14].

Guga, C., s.f. . *S.02 TecAnAsol4*. [En línea] Available at: <http://es.scribd.com/doc/170381531/S-02-TecAnAsol4>.

Hall, M. R., 2010. *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings*. Oxford: Woodhead Publishing Limited.

Hammond, G. & Jones, G., 2011. *Inventory of Carbon & Energy (ICE)*, Bath, UK: Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK.

Haves, P., 1992. En: *Energy Efficient Buildings: A Design Guide*. Oxford: Blackwell Scientific Publications Ltd, pp. 39-47.

INEGI, 2011. *Encuesta del Uso del Tiempo*, s.l.: Gobierno del Distrito Federal.

INEGI, 2012. *Anuario estadístico. Distrito Federal*, Ciudad de México: s.n.

INFONAVIT, 2006. *Dimensiones Mínimas de Vivienda de acuerdo a Disposiciones y Reglamentaciones Federales*, México: Disposiciones y Reglamentos de Vivienda.

Infonavit, 2010. *Cuarto Informe de Sustentabilidad*. Distrito Federal: Infonavit.

Krstic, A. D., 1998. Bioclimatic Rehabilitation of Existing Building Stock. *Renewable Energy*, pp. 337-342.

la Roche, P., 2013. *Carbon Counting in Architecture: A Comparison of Carbon Estimating Tools*. [En línea] Available at: www.tboake.com

Levins, R. & Lewontin, R., 1985. *The Dialectical Biologist*. En: Cambridge: Harvard Univ Pr, p. 185.

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D. & Ledo, L., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, p. 889–902.

Morgan, C. d. D. R., 2003. Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate. *Climate Research*, Volumen 24, p. 267–284.

Mourtada, A., 2013. *Energy Efficiency Building Expert*. [En línea] Available at: http://www.eie.gov.tr/projeler/document/TREE_Pres-2_Act_%201-7_Ank_Buildings%20Saving%20Potential_CORRECTED.pdf [Último acceso: mayo 2013].

Nicol, J. F., 2011. Adaptive comfort. *Building Research & Information*, p. 105.107.

Nicol, J. & Raja, I., 1996. *Thermal comfort, time and posture: exploratory*. Oxford: School of Architecture, England: Oxford Brookes University..

NOM-020-ENER-2011, 2011. *Eficiencia energética en edificaciones-Envolvente de edificios para uso habitacional*, México: Diario Oficial de la Federación, Gobierno Federal.

Olgyay, V., 1992. *Design With Climate*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Oral, G. K., Yener, A. K. & Bayazit, N. T., 2004. Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual, and acoustic comfort conditions. *Building and Environment*, p. 281 – 287.

Pezeu-Massabuau, J., s.f. *La vivienda como Espacio Social*. s.l.:s.n.

Raftery, P., Keane, M. & Costa, A., 2011. Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly. *Energy and Buildings*, p. 3666–3679.

Reportajes Cuarenta, 2014. *Asentamientos irregulares en Álvaro Obregón*. [En línea] Available at: <http://www.proyecto40.com/?p=40210> [Último acceso: 2014 Febrero 20].

Rincón, J. C. & Fuentes, V. A., 2014. *Bioclimatic Analysis Tool*. México, D.F.: s.n.

Saber, H. H., Swinton, M. C., Kalinger, P. & Paroli, R. M., 2012. Long-term hygrothermal performance of white and black roofs. *Building and Environment*, pp. 141-154.

SHF, 2005-2012. *Satisfacción Residencial en México*, s.l.: Sociedad Hipotecaria Federal del Gobierno de la República Mexicana.

SHF, 2012. *México: Rezago habitacional, Demanda de vivienda 2012 y Bono demográfico.* [En línea]

Available at: <http://www.shf.gob.mx/estadisticas/EstudiosVivienda/Documents/Rezago%20habitacional%20y%20Demanda%20de%20vivienda%202012.pdf>
[Último acceso: 2013 julio 15].

Silva Conde, M., 2011. *Uso de Aislamiento Térmico en la Vivienda*, México, D.F.: (AEAEE), Asociación de Empresas para el Ahorro de Energía en la Edificación.

SMA, 2010. *Agenda de Sustentabilidad Ambiental para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.* [En línea]
Available at: http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/asa_zmvm_sintesis.pdf
[Último acceso: 15 abril 2014].

Sue, R., Crichton, D. & Nicol, F., 2009. *Adapting Buildings and Cities for Climate Change*. Segunda edición ed. Burlington: Architectural Press.

The Concrete Center, 2009. *Dynamic Thermal Property Calculator (ver 1.0)*. s.l.:s.n.

Topaloğlu, B., 2003. *Solar Envelope and Form Generation in Architecture*, Tesis para obtener el grado de Mestro, Turquía: The Middle East Technical University.

Valerdi, H., 2011. *Desarrollo y Validación de una Metodología para estimar los Impactos en el Ahorro de Energía por el Uso de Sistemas Pasivo-Constructivos en la Edificación para diferentes Climats de México*, Mexico, D.F.: Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética. SENER-CONACYT.

Vivienda, I. d., 2013. *Instituto de Vivienda.* [En línea]
Available at: <http://www.invi.df.gob.mx/portal/programas.aspx>
[Último acceso: 10 Diciembre 2013].

Wang, J., Beltrán, L. O. & Kim, J., s.f. *From Static to Kinetic: A Review of Acclimated Kinetic Building Envelopes.* [En línea]
Available at: http://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0618_full%20paper.pdf
[Último acceso: 2013 septiembre 3].

Watson, D. & Labs, K., 1992. *Climatic Building Design*. s.l.:McGraw Hill.

Wilson, A., 1979. *Thermal Storage Wall Design Manual*. Albuquerque: New Mexico Solar Energy MEXICO SOLAR ENERGY ASSOCIATION.

Zea, V. D., 2011. *Rehabilitación Energética de Edificios. Estudio de Soluciones Constructivas y su Viabilidad Económica en la Rehabilitación Energética de la Cubierta de Edificios Existentes en Madrid*, Madrid: Universidad Politecnica de Mdrid.

Anexos

Anexo 1. Programación horaria de uso en el programa de simulación.

Densidad de ocupación de usuarios tipo para la simulación numérica.

ESPACIO	ÁREA (m ²)	USUARIO		
		US01_	US02_	US03_
COCINA	4.77	1.05	0.63	0.21
COMEDOR	9.59	0.52	0.31	0.10
SALA	16.49	0.30	0.18	0.06
RECAMARA 1	10.64	0.47	0.28	0.09
RECAMARA 2	10.08	0.50	0.30	0.10
ESCALERAS	6.75	0.74	0.44	0.15
BAÑO	3.20	1.56	0.94	0.31

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a datos generados en DesignBuilder

Programación de usuarios tipo para la simulación numérica.

ESPACIO	USUARIO 1	USUARIO 2	USUARIO 3
	US01_	US02_	US03_
	5 PERSONAS=1	3 PERSONAS=1	1 PERSONA=1
COCINA	Sche-dule:Compact, US01_COMEDOR, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 07:00, 0, Until: 07:30, 0.4, Until: 14:00, 0, Until: 14:30, 0.2, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 0.4, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 0, Until: 08:30, 0.4, Until: 15:00, 0, Until: 16:00, 0.2, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 0.4, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US02_COMEDOR, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 07:00, 0, Until: 07:30, 0.3, Until: 14:00, 0, Until: 14:30, 0..3, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 0.3, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 0, Until: 08:30, 0.3, Until: 15:00, 0, Until: 16:00, 0.3, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 0.3, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US03_COCINA, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 07:00, 0, Until: 07:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 1, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:30, 0, Until: 10:00, 1, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 1, Until:24:00, 0;
COMEDOR	Schedule:Compact, US01_COMEDOR, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 14:00, 0, Until: 15:00, 1,	Schedule:Compact, US02_COMEDOR, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 14:00, 0, Until: 15:00, 1,	Schedule:Compact, US03_COMEDOR, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until:24:00, 0, For: Weekends

	Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 0, Until: 10:00, 1, Until: 16:00, 0, Until: 17:30, 1, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 1, Until:24:00, 0;	Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 0, Until: 10:00, 1, Until: 16:00, 0, Until: 17:30, 1, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 1, Until:24:00, 0;	AllOtherDays, Until:24:00, 0;
SALA	Schedule:Compact, US01_SALA, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 18:00, 0, Until: 21:00, 0.6, Until: 22:00, 0.2, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 17:00, 0, Until: 22:00, 1, Until: 23:30, 0.4, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US02_SALA, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 18:00, 0, Until: 21:00, 0.7, Until: 22:00, 0.3, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 17:00, 0, Until: 22:00, 1, Until: 23:30, 0.3, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US03_SALA, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 21:00, 0, Until: 23:00, 0.5, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 21:00, 0, Until: 23:30, 0.5, Until:24:00, 0;
RECAMARA 1	Schedule:Compact, US01_RECAMARA1, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:00, 1, Until: 23:00, 0, Until: 24:00, 1. For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 1, Until: 23:30, 0, Until:24:00, 1;	Schedule:Compact, US02_RECAMARA1, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:00, 1, Until: 23:00, 0, Until: 24:00, 1. For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 1, Until: 23:30, 0, Until:24:00, 1;	Schedule:Compact, US03_RECAMARA, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:30, 1, Until: 23:00, 0, Until: 24:00, 1. For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 1, Until: 23:30, 0, Until:24:00, 1;
RECAMARA 2	Schedule:Compact, US01_RECAMARA2, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:30, 1, Until: 22:00, 0, Until: 24:00, 1. For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 1,	Schedule:Compact, US02_RECAMARA2, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:30, 1, Until: 22:00, 0, Until: 24:00, 1. For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 1,	Schedule:Compact, US03_RECAMARA2, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 21:00, 0, Until: 23:00, 0.5, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 21:00, 0,

	Until: 23:30, 0, Until:24:00, 1;	Until: 23:30, 0, Until:24:00, 1;	Until: 23:30, 0.5, Until:24:00, 0;
ESCALERAS	Schedule:Compact, US01_ESCALERAS, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:00, 0, Until: 22:00, 0.1, Until: 24:00, 0. For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 0, Until: 23:30, 0.1, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US02_ESCALERAS, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:30, 0, Until: 22:00, 0.1, Until: 24:00, 0. For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 0, Until: 23:30, 0.1, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US03_ESCALERAS, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 21:00, 0, Until: 23:00, 0.1, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 21:00, 0, Until: 23:30, 0.1, Until:24:00, 0;
BAÑO	Schedule:Compact, US01_BAÑO, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:00, 0, Until: 07:30, 1, Until: 14:00, 0, Until: 14:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 1, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 0, Until: 09:30, 1, Until: 15:30, 0, Until: 16:00, 1, Until: 21:00, 0, Until: 22:00, 1, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US02_BAÑO, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:00, 0, Until: 07:30, 1, Until: 14:00, 0, Until: 14:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 1, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 08:00, 0, Until: 09:30, 1, Until: 15:30, 0, Until: 16:00, 1, Until: 21:30, 0, Until: 22:00, 1, Until:24:00, 0;	Schedule:Compact, US03_BAÑO, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 06:30, 0, Until: 07:00, 1, Until: 21:00, 0, Until: 21:15, 1, Until:24:00, 0, For: Weekends AllOtherDays, Until: 09:00, 0, Until: 09:30, 1, Until: 21:00, 0, Until: 21:15, 1, Until:24:00, 0;

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a datos generados en DesignBuilder

Anexo 2. Evaluación del Confort

Temperaturas Operativas (°C) en viviendas de Universo de Estudio durante el mes de enero, abril y anual.

ID				USUARIO								
				U1			U2			U3		
				ENE	ABR	AÑO	ENE	ABR	AÑO	ENE	ABR	AÑO
M1	L1	O1		17.36	20.70	19.49	16.18	19.59	18.26	15.08	18.62	17.26
M1	L1	O2		17.56	20.90	19.63	16.13	19.83	18.43	15.06	18.85	17.45
M1	L1	O3		17.73	21.05	19.76	16.32	19.95	18.58	15.26	18.98	17.61
M1	L1	O4		17.64	20.37	19.40	16.53	19.52	18.45	15.51	18.54	17.49

M1	L1	O5	17.43	20.99	19.48	16.27	19.95	18.54	15.19	18.96	17.55
M1	L1	O6	17.25	20.61	19.36	16.06	19.79	18.39	14.97	18.81	17.39
M1	L2	O1	16.96	19.90	18.80	15.71	19.00	17.76	14.49	17.89	16.64
M1	L2	O2	16.88	20.14	18.95	15.63	19.28	17.93	14.44	18.15	16.81
M1	L2	O3	17.04	20.24	19.08	15.80	19.40	18.07	14.61	18.29	16.96
M1	L2	O4	17.18	19.85	18.93	15.98	18.95	17.92	14.82	17.82	16.82
M1	L2	O5	17.00	20.25	19.04	15.76	19.41	18.03	14.55	18.28	16.90
M1	L2	O6	16.83	20.10	18.92	15.56	19.24	17.89	14.35	18.11	16.76
M1	L3	O1	18.84	20.35	19.93	17.82	19.81	19.26	15.56	17.62	17.03
M1	L3	O2	18.62	20.81	20.11	17.56	20.34	19.48	15.27	18.32	17.34
M1	L3	O3	18.72	21.01	20.25	17.67	20.58	19.65	15.33	18.63	17.54
M1	L3	O4	18.75	20.11	19.92	17.65	19.80	19.24	15.35	17.61	17.00
M1	L3	O5	18.66	21.04	20.22	17.63	20.62	19.69	15.26	18.68	17.50
M1	L3	O6	18.60	20.50	20.26	17.50	20.31	19.46	15.11	18.28	17.28
M2	L1	O1	16.96	19.90	19.26	16.29	19.63	18.34	15.21	18.63	17.33
M2	L1	O2	16.88	20.14	19.41	16.24	19.89	18.53	15.15	18.93	17.52
M2	L1	O3	17.04	20.24	19.55	16.43	20.01	18.68	15.35	19.02	17.69
M2	L1	O4	17.18	19.85	19.42	16.66	19.57	18.55	15.60	18.56	17.54
M2	L1	O5	17.00	20.25	19.51	16.17	19.86	18.48	15.30	19.05	17.64
M2	L1	O6	16.83	20.10	19.38	16.39	20.02	18.64	15.06	18.88	17.46
M2	L2	O1	17.07	19.93	18.88	15.81	19.04	17.83	14.63	17.92	16.70
M2	L2	O2	16.99	20.19	19.03	15.73	19.33	18.01	14.53	18.68	16.90
M2	L2	O3	17.15	20.31	19.16	15.91	19.46	18.16	14.72	18.39	17.06
M2	L2	O4	17.31	19.89	19.02	16.11	18.97	18.00	14.93	18.68	16.88
M2	L2	O5	17.11	20.31	19.13	15.87	19.46	18.13	14.67	18.39	17.02
M2	L2	O6	16.93	20.15	19.00	15.66	19.29	17.97	14.45	18.68	16.85
M2	L3	O1	19.09	20.48	20.12	18.11	19.92	19.45	15.89	17.76	17.28
M2	L3	O2	18.85	20.97	20.31	17.83	20.49	19.69	15.58	18.52	17.61
M2	L3	O3	18.96	21.18	20.46	17.95	20.74	19.88	15.66	18.85	17.83
M2	L3	O4	19.02	20.47	20.12	17.95	19.91	19.44	15.72	18.68	17.26
M2	L3	O5	18.92	21.22	20.44	17.91	20.79	19.85	15.59	18.91	17.79
M2	L3	O6	18.83	20.94	20.30	17.76	20.46	19.67	15.44	18.48	17.56
M3	L1	O1	17.01	20.16	18.92	16.01	19.39	18.05	15.05	18.49	17.13
M3	L1	O2	16.92	20.47	19.01	15.90	19.74	18.25	14.93	18.80	17.35
M3	L1	O3	17.14	20.60	19.27	16.14	19.88	18.44	15.18	19.02	17.56
M3	L1	O4	17.40	20.10	19.12	16.45	19.31	18.28	15.51	18.40	17.38
M3	L1	O5	17.10	20.60	19.22	16.10	19.89	18.40	15.13	19.03	17.50
M3	L1	O6	16.86	20.43	19.06	15.83	19.69	18.20	14.84	18.81	17.30
M3	L2	O1	16.74	19.72	18.58	15.58	18.85	17.58	14.54	17.88	16.59
M3	L2	O2	16.62	20.05	18.76	15.44	19.24	17.79	14.41	18.28	16.82
M3	L2	O3	16.83	20.19	18.93	15.66	19.39	17.97	14.63	18.45	17.01
M3	L2	O4	17.08	19.66	18.76	15.96	18.78	17.79	14.95	17.80	16.81
M3	L2	O5	16.79	20.20	18.89	15.62	19.40	17.93	14.59	18.46	16.97

M3	L2	O6	16.56	20.01	18.72	15.36	19.19	17.74	14.31	18.23	16.76
M3	L3	O1	18.34	20.05	19.52	17.15	19.31	18.63	15.45	17.62	16.92
M3	L3	O2	18.01	20.57	19.73	16.86	19.95	18.90	15.12	18.37	17.25
M3	L3	O3	18.27	20.78	19.91	17.01	20.20	19.11	15.26	18.68	17.49
M3	L3	O4	18.44	20.01	19.59	17.17	19.27	18.68	15.47	17.57	16.98
M3	L3	O5	18.21	20.82	19.88	16.97	20.25	19.07	15.19	18.73	17.44
M3	L3	O6	18.05	20.54	19.70	16.76	19.91	18.85	14.96	18.32	17.18

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a datos generados en DesignBuilder

Temperaturas Operativas (°C) en el interior de la Recámara 1 durante el mes de abril para en usuario tipo U1.

ID			ABR
M1	L1	O1	28.56
M1	L1	O2	29.49
M1	L1	O3	30.02
M1	L1	O4	21.26
M1	L1	O5	29.98
M1	L1	O6	29.36
M1	L2	O1	26.61
M1	L2	O2	27.09
M1	L2	O3	27.41
M1	L2	O4	19.46
M1	L2	O5	27.44
M1	L2	O6	27.01
M1	L3	O1	25.47
M1	L3	O2	26.25
M1	L3	O3	28.98
M1	L3	O4	20.58
M1	L3	O5	29.02
M1	L3	O6	27.36
M2	L1	O1	28.55
M2	L1	O2	29.52
M2	L1	O3	30.07
M2	L1	O4	21.35
M2	L1	O5	30.03
M2	L1	O6	29.39
M2	L2	O1	26.68
M2	L2	O2	27.71
M2	L2	O3	28.29
M2	L2	O4	20.09
M2	L2	O5	28.24
M2	L2	O6	27.56

M2	L3	O1	25.53
M2	L3	O2	27.92
M2	L3	O3	29.49
M2	L3	O4	20.94
M2	L3	O5	29.52
M2	L3	O6	27.78
M3	L1	O1	27.97
M3	L1	O2	29.15
M3	L1	O3	29.76
M3	L1	O4	21.13
M3	L1	O5	29.71
M3	L1	O6	29.00
M3	L2	O1	26.24
M3	L2	O2	27.48
M3	L2	O3	28.12
M3	L2	O4	19.97
M3	L2	O5	28.05
M3	L2	O6	27.30
M3	L3	O1	25.00
M3	L3	O2	27.38
M3	L3	O3	28.87
M3	L3	O4	20.50
M3	L3	O5	28.78
M3	L3	O6	27.14

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a datos generados en DesignBuilder

Temperaturas Operativas (°C) en el interior de la Recámara 1 durante el mes de enero para en usuario tipo U1.

ID			ABR
M1	L1	O1	16.56
M1	L1	O2	16.15
M1	L1	O3	15.73
M1	L1	O4	16.74
M1	L1	O5	15.61
M1	L1	O6	15.29
M1	L2	O1	17.45
M1	L2	O2	16.52
M1	L2	O3	15.70
M1	L2	O4	15.95
M1	L2	O5	15.68
M1	L2	O6	16.35
M1	L3	O1	19.72

M1	L3	O2	18.34
M1	L3	O3	16.73
M1	L3	O4	18.10
M1	L3	O5	16.51
M1	L3	O6	18.11
M2	L1	O1	16.63
M2	L1	O2	16.21
M2	L1	O3	15.80
M2	L1	O4	17.72
M2	L1	O5	15.77
M2	L1	O6	16.11
M2	L2	O1	17.62
M2	L2	O2	16.53
M2	L2	O3	15.67
M2	L2	O4	16.81
M2	L2	O5	15.64
M2	L2	O6	16.36
M2	L3	O1	21.23
M2	L3	O2	19.86
M2	L3	O3	17.95
M2	L3	O4	19.24
M2	L3	O5	17.71
M2	L3	O6	19.61
M3	L1	O1	16.58
M3	L1	O2	16.11
M3	L1	O3	15.64
M3	L1	O4	15.04
M3	L1	O5	15.62
M3	L1	O6	16.01
M3	L2	O1	17.32
M3	L2	O2	16.36
M3	L2	O3	15.54
M3	L2	O4	17.12
M3	L2	O5	15.50
M3	L2	O6	16.22
M3	L3	O1	21.24
M3	L3	O2	19.78
M3	L3	O3	17.74
M3	L3	O4	19.09
M3	L3	O5	17.46
M3	L3	O6	19.47

Nota: Fuente. Elaboración propia en base a datos generados en DesignBuilder

Anexo 3. Cálculo del Balance Térmico

El contenido de las tablas con los resultados del Cálculo del Balance Térmico se ordenó de acuerdo a los datos de la misma: En sentido vertical, las filas fueron ordenadas de menor a mayor de arriba hacia abajo de acuerdo a los totales generales de la última columna que indica la suma del balance térmico de todos los elementos constructivos de cada fila o caso. En sentido horizontal el orden es de mayor a menor, de izquierda a derecha, del mismo modo, las columnas fueron ordenadas de acuerdo a los totales generales de la última fila que representa la suma del balance térmico de todos los casos por elemento constructivo. Las gráficas muestran la relación de pérdidas y ganancias de cada factor incluido en el balance y fueron ordenadas de mayor pérdida de calor a mayor ganancia en las leyendas de la derecha.

Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U1.

	Vent Exterior kWh	Muros kWh	Cubiertas kWh	Suelos sobre terreno kWh	Balance total
M3 L2	-468.61	-1675.70	-1719.22	-1609.59	-7029.96
M1 L2	-627.34	-1004.06	-1910.06	-1792.96	-6970.00
M2 L2	-645.01	-800.50	-1981.31	-1848.34	-6948.42
M3 L1	-391.89	-1622.13	-1970.56	-1571.81	-7064.63
M1 L1	-782.91	-1174.91	-1062.00	-2002.46	-6899.89
M2 L1	-805.97	-951.64	-1145.26	-2061.40	-6881.18
M3 L3	-265.37	-2295.62	-1135.26	-1423.99	-6804.12
M1 L3	-308.42	-1375.88	-1563.02	-1603.83	-6697.25
M2 L3	-320.73	-1138.05	-1660.77	-1661.87	-6677.42

Nota: Elaboración propia.

Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U2.

	Suelos (int) kWh	Acristalamiento kWh	Suelos sobre terreno kWh	Muros kWh	Balance total
M3 L2	-546.92	-454.67	-822.65	-1076.30	-3901.05
M1 L2	-580.03	-480.85	-962.03	-680.67	-3888.94
M2 L2	-600.84	-492.99	-1010.42	-515.62	-3875.83
M3 L1	-833.88	-541.67	-1043.18	-1426.61	-3853.00
M1 L1	-882.88	-574.97	-1210.36	-871.86	-3825.32
M2 L1	-906.21	-588.65	-1266.29	-686.47	-3815.99
M3 L3	-169.50	-677.96	-631.21	-1833.40	-3823.34
M1 L3	-216.89	-799.57	-778.07	-1217.16	-3716.15
M2 L3	-230.93	-840.04	-825.34	-1019.36	-3676.94

Nota: Elaboración propia.

Balance Térmico anual de elementos constructivos en la vivienda con el Usuario U3.

	Suelos (int)	Suelos sobre terreno	Acristalamiento	Muros	Total
	kWh	kWh	kWh	kWh	
M3 L2	-334.20	-276.41	-323.12	-482.50	-1522.76
M1 L2	-339.74	-345.77	-335.29	-334.41	-1528.99
M2 L2	-353.11	-385.59	-344.97	-208.19	-1523.71
M3 L3	-94.28	-127.89	-442.44	-826.33	-1500.18
M3 L1	-656.80	-539.80	-424.91	-888.07	-1511.88
M1 L1	-691.98	-656.01	-450.19	-566.26	-1502.66
M2 L1	-708.48	-703.54	-461.31	-415.34	-1500.60
M1 L3	-109.44	-197.68	-493.01	-547.03	-1512.30
M2 L3	-133.81	-252.95	-557.75	-469.07	-1495.84

Nota: Elaboración propia.

Anexo 4. Comparación de Aislantes con Tres Variables de Evaluación

Las tablas muestran los cálculos obtenidos de la evaluación de cada solución y son separados en tipo de elemento constructivo. Los encabezados de cada tabla indican el proceso dentro de la evaluación para cada valor (Resistencia Térmica R, Precio P y Carbono incorporado EC); el encabezado *Valores* contiene la información original obtenida para cada solución, en esta etapa sólo se identifican los valores de referencia o las mejores soluciones de acuerdo a cada variable; en el encabezado *Diferencia*, el resto de los valores son comparados a partir del modelo matemático, por lo tanto, los valores de referencia de cada campo serán igual a 0. Debido a que los valores tienen el mismo peso o importancia, se calcula el porcentaje que la solución representa en el campo, este valor se encuentra en el encabezado *Proporcional*, la suma de los valores por columna es igual a 1²⁷, de esta manera, se elimina la desproporción existente por unidades. Una vez calculados los valores correspondientes a cada solución, se asigna un valor de campo a un cateto por lo que se calcula la hipotenusa de cada campo para conocer la longitud de los lados del triángulo y se muestra en la columna *Hipotenusas* en base a la fórmula de Herón. Conociendo esto, se puede calcular el área del triángulo por cada solución presentada en la columna *Área*.

Comparación de Sistemas de Aislamiento en Muros.

ID	Valores			Diferencia			Proporcional			Hipotenusas			Área
	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	-

²⁷ Para fines prácticos, los valores proporcionales fueron multiplicados por 10 para obtener unidades de área entre 0 y 50. Esta multiplicación depende del caso de estudio ya que lo que se evalúa en el método es la proporción entre valores.

Am1	1.10	627.98	2.50	0.55	446.8	1.30	0.13	0.19	0.18	0.27	0.23	0.23	4.75
Am2	1.65	896.84	1.20	0.00	715.6	0.00	0.00	0.31	0.00	0.31	0.00	0.31	0.00
Am3	0.55	802.59	2.50	1.10	621.4	1.30	0.27	0.27	0.18	0.32	0.32	0.38	15.97
Am4	0.90	252.67	2.70	0.75	71.5	1.50	0.18	0.03	0.21	0.21	0.28	0.18	4.48
Am5	1.10	289.54	1.20	0.55	108.3	0.00	0.13	0.05	0.00	0.05	0.13	0.14	0.16
Am6	1.10	406.3	1.20	0.55	225.1	0.00	0.13	0.10	0.00	0.10	0.13	0.16	0.46
Am7	1.22	321.79	2.70	0.43	140.6	1.50	0.10	0.06	0.21	0.22	0.24	0.12	2.12
Am8	1.45	181.2	2.70	0.20	0.0	1.50	0.05	0.00	0.21	0.21	0.22	0.05	0.51

Nota: Elaboración propia

Comparación de Sistemas de Aislamiento en Suelos.

ID	Valores			Diferencia			Proporcional			Hipotenusas			Área
	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	-
As1	1.40	284.12	1.20	0.10	249.5	0.22	0.03	0.24	0.05	0.25	0.06	0.25	0.29
As2	0.95	34.67	2.04	0.55	0.0	1.06	0.17	0.00	0.23	0.23	0.28	0.17	4.35
As3	0.75	77.9	2.55	0.75	43.2	1.57	0.23	0.04	0.34	0.34	0.41	0.23	15.39
As4	1.50	317.61	2.55	0.00	282.9	1.57	0.00	0.28	0.34	0.44	0.34	0.28	14.33
As5	0.56	380.69	0.98	0.94	346.0	0.00	0.29	0.34	0.00	0.34	0.29	0.44	13.30
As6	0.55	134.34	1.20	0.95	99.7	0.22	0.29	0.10	0.05	0.11	0.29	0.30	2.89

Nota: Elaboración propia

Comparación de Sistemas de Aislamiento en Techos.

ID	Valores			Diferencia			Proporcional			Hipotenusas			Área
	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	R	P	EC	-
At1	1.25	395.58	3.48	0.25	271.8	2.28	0.16	0.26	0.29	0.39	0.33	0.31	16.04
At2	1.50	166.16	2.55	0.00	42.4	1.35	0.00	0.04	0.17	0.17	0.17	0.04	0.23
At3	1.30	338.95	2.70	0.20	215.2	1.50	0.13	0.21	0.19	0.28	0.23	0.25	5.32
At4	1.30	275.63	1.20	0.20	151.9	0.00	0.13	0.15	0.00	0.15	0.13	0.20	0.81
At5	1.13	474.42	2.70	0.37	350.7	1.50	0.24	0.34	0.19	0.39	0.31	0.42	18.43
At6	1.00	123.75	2.55	0.50	0.0	1.35	0.33	0.00	0.17	0.17	0.37	0.33	8.65

Nota: Elaboración propia

Anexo 5. Programación horaria de Muro Trombe

Programación para las aberturas del muro trombe.

Rejillas

Schedule: Compact,
Summer vent,
Fraction,
Through: 31 Mar,
For: WinterDesignDay,
Until: 06:00, 0,
Until: 18:00, 1,
Until: 24:00, 0,

Through: 30 Sep,
For: AllDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 31 Dec,
For: WinterDesignDay,
Until: 06:00, 0,
Until: 18:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: AllDays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 24:00, 0 ;

Nota: Elaboración propia.

Anexo 6. Evaluación de Soluciones Constructivas

A continuación los resultados son divididos por tipo de usuario, la columna A indica el tipo de aislamiento aplicado a cada caso de acuerdo a las claves asignadas en la Figura 43, la columna To1 indica la temperatura operativa anual original al interior de la vivienda mientras que la columna To2 indica la temperatura operativa anual al interior de la vivienda una vez implementado el tipo de aislamiento correspondiente.

Temperaturas Operativas (°C) en el interior de la Recámara 1 durante el mes de enero para en usuario tipo U1 despues de la integración del Muro trombe

ID			Usuario U1			Usuario U2			Usuario U3		
			A	To1	To2	A	To1	To2	A	To1	To2
M1	L1	O1				S+T	18.26	19.37	S+F	17.26	19.26
M1	L1	O2				S+T	18.43	19.49		17.45	18.86
M1	L1	O3				S	18.58	19.22	S+F	17.61	18.77
M1	L1	O4				S+T	18.45	19.53	S+F	17.49	18.69
M1	L1	O5				S+T	18.54	19.56	S+F	17.55	18.73
M1	L1	O6				S+T	18.39	19.46	S+T	17.39	18.83
M1	L2	O1	T	18.80	19.48	S+T	17.76	19.61	S+T+F	16.64	19.92
M1	L2	O2	T	18.95	19.60	S+T	17.93	19.73	S+T+F	16.81	19.26
M1	L2	O3	T	19.08	19.71	S+T	18.07	19.84	S+T+F	16.96	19.37
M1	L2	O4	T	18.93	19.62	S+T	17.92	19.75	S+T+F	16.82	19.29
M1	L2	O5	T	19.04	19.67	S+T	18.03	19.80	S+T+F	16.90	19.33
M1	L2	O6	T	18.92	19.56	S+T	17.89	19.69	S+T+F	16.76	19.23
M1	L3	O1							S	17.03	19.40
M1	L3	O2							S	17.34	19.58
M1	L3	O3							S	17.54	19.71
M1	L3	O4							S	17.00	19.40
M1	L3	O5							S	17.50	19.69
M1	L3	O6							S	17.28	19.57
M2	L1	O1		18.80		T	18.34	19.89	S+F	17.33	19.24

M2	L1	O2		18.95		S	18.53	19.27	S+F	17.52	18.87
M2	L1	O3		19.08		S	18.68	19.41	S+F	17.69	19.01
M2	L1	O4		18.93		S	18.55	19.28	S+F	17.54	18.88
M2	L1	O5		19.04		S	18.48	19.37	S+F	17.64	18.97
M2	L1	O6		18.92		S	18.64	19.24	S+F	17.46	18.84
M2	L2	O1	T	18.88	19.58	S+T	17.83	19.86	S+T+F	16.70	18.09
M2	L2	O2	F	19.03	19.32	S+T	18.01	19.99	S+T	16.90	18.29
M2	L2	O3	F	19.16	19.45	S+T	18.16	20.12	S+T	17.06	18.45
M2	L2	O4	F	19.02	19.30	S+T	18.00	19.98	S+T	16.88	18.27
M2	L2	O5	F	19.13	19.42	S+T	18.13	20.09	S+T	17.02	18.41
M2	L2	O6	F	19.00	19.29	S+T	17.97	19.96	S+T	16.85	18.24
M2	L3	O1				F	19.45	19.35	S+F	17.28	18.22
M2	L3	O2				F	19.69	19.54	S+F	17.61	18.74
M2	L3	O3				F	19.88	19.68	S+F	17.83	19.06
M2	L3	O4				F	19.44	19.36	S+F	17.26	18.18
M2	L3	O5				F	19.85	19.66	S+F	17.79	19.00
M2	L3	O6				F	19.67	19.53	S+F	17.56	18.68
M3	L1	O1	T	18.92	19.20	S+F	18.05	19.47	S+F	17.13	19.38
M3	L1	O2	F	19.01	19.27	S+F	18.25	19.65	S+F	17.35	19.11
M3	L1	O3				S+F	18.44	19.82	S+F	17.56	19.28
M3	L1	O4	F	19.12	19.29	S+F	18.28	19.67	S+F	17.38	19.13
M3	L1	O5				S+F	18.40	19.77	S+F	17.50	19.23
M3	L1	O6	F	19.06	19.23	S+F	18.20	19.61	S+F	17.30	19.07
M3	L2	O1	T	18.58	19.14	S+T+F	17.58	19.35	S+T+F	16.59	20.19
M3	L2	O2	T	18.76	19.32	S+T	17.79	19.35	S+T+F	16.82	20.37
M3	L2	O3	T	18.93	19.48	S+T	17.97	19.51	S+T+F	17.01	20.53
M3	L2	O4	T	18.76	19.32	S+T	17.79	19.35	S+T+F	16.81	20.37
M3	L2	O5	T	18.89	19.44	S+T	17.93	19.47	S+T+F	16.97	20.49
M3	L2	O6	T	18.72	19.28	S+T	17.74	19.31	S+T+F	16.76	20.33
M3	L3	O1				F	18.63	19.98	S+T+F	16.92	19.03
M3	L3	O2				S	18.90	19.34	S+F	17.25	19.24
M3	L3	O3				S	19.11	19.51	S+F	17.49	19.41
M3	L3	O4				S	18.68	19.20	S+F	16.98	19.10
M3	L3	O5				S	19.07	19.48	S+F	17.44	19.38
M3	L3	O6				S	18.85	19.31	S+F	17.18	19.21

Nota: S: Suelo; F: Fachada, T: Techo; S+T: Suelo y Techo; S+F: Suelo y Fachada; S+T+F: Suelo Techo y Fachada.
Fuente: Elaboración Propia.

Temperaturas Operativas (°C) en el interior de la Recámara 1 durante el mes de enero para en usuario tipo U1 despues de la integración del Muro trombe

ID	ENE
M1 L1 O1	17.82
M1 L1 O2	17.26
M1 L1 O3	16.61

M1	L1	O4	
M1	L1	O5	16.55
M1	L1	O6	17.11
M1	L2	O1	19.65
M1	L2	O2	18.57
M1	L2	O3	17.53
M1	L2	O4	
M1	L2	O5	17.53
M1	L2	O6	18.4
M1	L3	O1	21.89
M1	L3	O2	20.37
M1	L3	O3	18.45
M1	L3	O4	
M1	L3	O5	18.25
M1	L3	O6	20.11
M2	L1	O1	17.78
M2	L1	O2	17.21
M2	L1	O3	16.55
M2	L1	O4	
M2	L1	O5	16.49
M2	L1	O6	17.07
M2	L2	O1	19.51
M2	L2	O2	18.28
M2	L2	O3	17.21
M2	L2	O4	
M2	L2	O5	17.18
M2	L2	O6	18.11
M2	L3	O2	23.65
M2	L3	O3	21.12
M2	L3	O4	
M2	L3	O5	20.89
M2	L3	O6	23.35
M3	L1	O1	17.93
M3	L1	O2	17.27
M3	L1	O3	16.61
M3	L1	O4	
M3	L1	O5	16.53
M3	L1	O6	17.11
M3	L2	O1	19.77
M3	L2	O2	18.7
M3	L2	O3	17.58
M3	L2	O4	
M3	L2	O5	17.55

M3	L2	O6	18.5
M3	L3	O3	21.84
M3	L3	O4	
M3	L3	O5	21.49

Nota: Fuente: Elaboración propia

Temperaturas Operativas (°C) en el interior de la Recámara 1 durante el mes de abril para en usuario tipo U1 despues de la integración de los Dispositivos de Control Solar (To2) y el Aislamiento en Cubiertas (To3)

ID	ABR	
	To2	To3
M1 L1 O1	28.56	24.17
M1 L1 O2	28.35	24.72
M1 L1 O3	28.63	25.13
M1 L1 O4		
M1 L1 O5	28.58	25.22
M1 L1 O6	28.17	24.74
M1 L2 O1	26.61	26.61
M1 L2 O2	26.04	25.95
M1 L2 O3	26.14	26.02
M1 L2 O4		
M1 L2 O5	26.16	26.04
M1 L2 O6	25.91	25.82
M1 L3 O1	25.47	25.47
M1 L3 O2	25.23	25.11
M1 L3 O3	27.64	24.26
M1 L3 O4		
M1 L3 O5	27.67	24.41
M1 L3 O6	26.25	23.05
M2 L1 O1	28.55	24.20
M2 L1 O2	28.37	24.75
M2 L1 O3	28.68	25.17
M2 L1 O4		
M2 L1 O5	28.63	25.26
M2 L1 O6	28.20	24.77
M2 L2 O1	26.68	26.68
M2 L2 O2	26.63	26.57
M2 L2 O3	26.98	26.90
M2 L2 O4		
M2 L2 O5	26.92	26.84
M2 L2 O6	26.44	26.37
M2 L3 O1	25.53	25.53

M2	L3	O2	26.84	26.78
M2	L3	O3	28.13	24.69
M2	L3	O4		
M2	L3	O5	28.14	24.83
M2	L3	O6	26.65	23.41
M3	L1	O1	27.97	23.67
M3	L1	O2	28.02	24.43
M3	L1	O3	28.39	24.91
M3	L1	O4		
M3	L1	O5	28.32	24.99
M3	L1	O6	27.82	24.44
M3	L2	O1	26.24	26.24
M3	L2	O2	26.41	26.34
M3	L2	O3	26.82	26.73
M3	L2	O4		
M3	L2	O5	26.74	26.65
M3	L2	O6	26.19	26.11
M3	L3	O1	25.00	25.00
M3	L3	O2	26.32	26.24
M3	L3	O3	27.48	24.12
M3	L3	O4		
M3	L3	O5	27.39	24.17
M3	L3	O6	25.75	25.95

Nota: Fuente: Elaboración propia